

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

**Vliv přípravy metalografických vzorků na hodnocení cementace a
povrchového kalení ocelí**

**The influence of metallographic specimen preparation
on evaluation of carburizing and case hardening of steels**

KMT – B – 191

Petr HYNEK

Vedoucí práce:	doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
Konzultant:	Ing. Václav Kubíček
Počet stran:	45
Počet tabulek:	4
Počet obrázků:	23
Počet grafů:	2
Počet příloh:	20 stran (21 tabulek, 17 obrázků, 21 grafů)

Datum: 24. 5. 2012



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Petr H Y N E K
studijní program	2341 B Strojírenství
obor	Materiály a technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Vliv přípravy metalografických vzorků na hodnocení cementace a povrchového kalení ocelí

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s technologickými a užitnými vlastnostmi cementovaných a povrchově kalených vrstev ocelí; s případy nesprávného metalografického vyhodnocení vrstev.
2. Seznamte se s doporučeným způsobem dělení vzorků a přípravy metalografických výbrusů.
3. Proved'te experimenty vzorků s kontrolovanými odchylkami od doporučené technologie dělení a přípravy.
4. Porovnejte předpokládané a změřené tvrdosti a struktury. Formulujte poznatky.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

[1] Kolektiv autorů www.STRUERS.cz, Firemní publikace – optimální příprava a hodnocení metalografických výbrusů.

[2] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o. Brno 1999. ISBN 80 – 7204 – 130 – 4.


Vedoucí bakalářské práce:


doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Václav Kubíček




prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
vedoucí katedry


doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.
děkan

V Liberci dne 26.10.2011

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2012

Podpis:

Petr Hynek

Poděkování

Rád bych tímto způsobem poděkoval doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za vedení práce. Zároveň také děkuji Ing. Václavu Kubíčkovi a paní Vlastě Čílové za neocenitelnou pomoc při zpracování experimentální části práce. Rovněž děkuji své rodině a přátelům za podporu, kterou mi poskytovali během celé doby studia.

Anotace

Teoretická část práce se zabývá technologickými a užitnými vlastnostmi cementovaných a povrchově kalených vrstev a způsoby jejich výroby. Následuje charakteristika základních metod pro metalografické zkoumání materiálu, a to optické mikroskopie a měření tvrdosti. Teoretickou část uzavírá popis mechanické preparace metalografických vzorků a jejího možného vlivu na hodnocení cementace a povrchového kalení ocelí.

Experimentální část práce sleduje vliv chlazení a druhu řezného kotouče použitých při abrazivním řezání na hodnocení gradientu tvrdosti a struktury u vzorků z oceli ČSN 12 050.6 indukčně povrchově kalené a ČSN 14 220.4 cementované.

Klíčová slova:

abrazivní řezání, cementace, metalografie, oceli, povrchové kalení, příprava vzorku, tvrdost

Annotation

The theoretical part of the thesis deals with technological and usable properties of carburized and case hardened layers and with ways of their production. This is followed by the characteristics of fundamental methods of metallographic examination of material, specifically optical microscopy and hardness testing. The theoretical part concludes with the description of the mechanical preparation of metallographic specimens and its possible influence on the evaluation of carburised and case hardened steels.

The experimental part of the thesis evaluates the influence of cooling and type of cutting wheel used during abrasive cutting on measurements of hardness gradient and on evaluations of structure executed on specimens made of steels ČSN 12 050.6 inductively case hardened, and ČSN 14 220.4 carburized.

Keywords:

abrasive cutting, carburizing, metallography, steels, case hardening, a specimen preparation, hardness

Seznam použitých zkratek a symbolů

- A₁** – eutektoidní teplota soustavy železo-uhlík
- A₃** – teplota stanovující dolní hranici stability austenitu podeutektoidního složení
- A_{cm}** – teplota stanovující dolní hranici stability austenitu nadeutektoidního složení
- ARA** – anizotermický rozpad austenitu
- CBN** – cubic boron nitride (kubický nitrid bóru)
- CCT** – continuous cooling transformation (anglická fráze pro ARA)
- CHD** – case hardness depth (hloubka prokalení)
- ČSN** – označení české technické normy
- HB** – Brinell hardness (tvrdost podle Brinella)
- HK** – Knoop hardness (tvrdost podle Knoopu)
- HL** – hardness limit (limitní tvrdost)
- HR** – Rockwell hardness (tvrdost podle Rockwella)
- HV** – Vickers hardness (tvrdost podle Vickerse)
- M_f** – martenzit finiš (teplota konce martenzitické transformace)
- M_s** – martenzit start (teplota počátku martenzitické transformace)

Obsah bakalářské práce

1	ÚVOD.....	5
2	TECHNOLOGICKÉ A UŽITNÉ VLASTNOSTI CEMENTOVANÝCH A POVRCHOVĚ KALENÝCH VRSTEV	6
2.1	ÚČEL CEMENTACE A POVRCHOVÉHO KALENÍ	6
2.2	PRINCIPY CEMENTACE A POVRCHOVÉHO KALENÍ	7
2.2.1	<i>Cementace.....</i>	8
2.2.2	<i>Povrchové kalení.....</i>	9
3	METODY HODNOCENÍ CEMENTOVANÝCH A POVRCHOVĚ KALENÝCH VRSTEV	10
3.1	SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE	10
3.2	MĚŘENÍ TVRDOSTI	15
3.2.1	<i>Měření tvrdosti povrchově tepelně zpracovaných ocelí</i>	<i>18</i>
4	PŘÍPRAVA METALOGRAFICKÝCH VZORKŮ	21
4.1	ODBĚR VZORKŮ	22
4.2	OZNAČOVÁNÍ VZORKŮ.....	24
4.3	ZALÉVÁNÍ VZORKŮ	24
4.3.1	<i>Zalévání za studena</i>	<i>24</i>
4.3.2	<i>Tlakové zalévání za tepla</i>	<i>25</i>
4.4	BROUŠENÍ A LEŠTĚNÍ VZORKŮ	26
4.4.1	<i>Mechanické broušení</i>	<i>26</i>
4.4.2	<i>Mechanické leštění.....</i>	<i>27</i>
4.5	LEPTÁNÍ VZORKŮ.....	27
4.6	MOŽNÉ VLIVY MECHANICKÉ PREPARACE NA HODNOCENÍ VZORKŮ.....	28
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE – VLIV CHLAZENÍ A TYPU ŘEZNÉHO KOTOUČE NA MĚŘENÍ GRADIENTU TVRDOSTI	30
5.1	ZKOUŠENÉ SOUČÁSTI.....	30
5.2	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ A METODY	31
5.3	VLASTNÍ MĚŘENÍ	33

5.3.1	<i>Měření povrchově kaleného čepu</i>	34
5.3.2	<i>Měření cementovaného víka</i>	36
6	DISKUSE VÝSLEDKŮ	38
6.1	POVRCHOVĚ KALENÝ ČEP VAHADEL	38
6.2	CEMENTOVANÉ VÍKO AXIÁLNÍHO LOŽISKA	40
7	ZÁVĚR	42
8	POUŽITÁ LITERATURA	43
9	PŘÍLOHY	45
9.1	ČEP VAHADEL - NÁKRES	PŘÍLOHA 1
9.2	VÍKO AXIÁLNÍHO LOŽISKA - NÁKRES	PŘÍLOHA 2
9.3	MĚŘENÍ GRADIENTU TVRDOSTI – ČEP (HŘÍDEL)	PŘÍLOHA 3 AŽ 12
9.4	MĚŘENÍ GRADIENTU TVRDOSTI – VÍKO (PŘÍRUBA)	PŘÍLOHA 13 AŽ 20

1 Úvod

Ocel, nejpoužívanější technický kovový materiál, je slitina železa s uhlíkem a dalšími prvky, jejíž vnitřní struktura se skládá ze zrn. Chemické složení (především množství uhlíku rozpustěného v železe), velikost a tvar zrn mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti oceli. Strukturu, a tedy i vlastnosti oceli, lze měnit nejen v celém objemu výrobku, ale i v omezené vzdálenosti od povrchu, a to, kromě jiných metod, cementací či povrchovým kalením.

Obor, který se zabývá souvislostmi mezi vnitřní stavbou kovů a jejich mechanickými vlastnostmi, se nazývá *metalografie*. Metalografie nachází uplatnění jak během výroby, a to při kontrole výrobních procesů a dalšího zpracování materiálu, tak při hledání příčin vad výrobků či důvodů selhání celých zařízení.

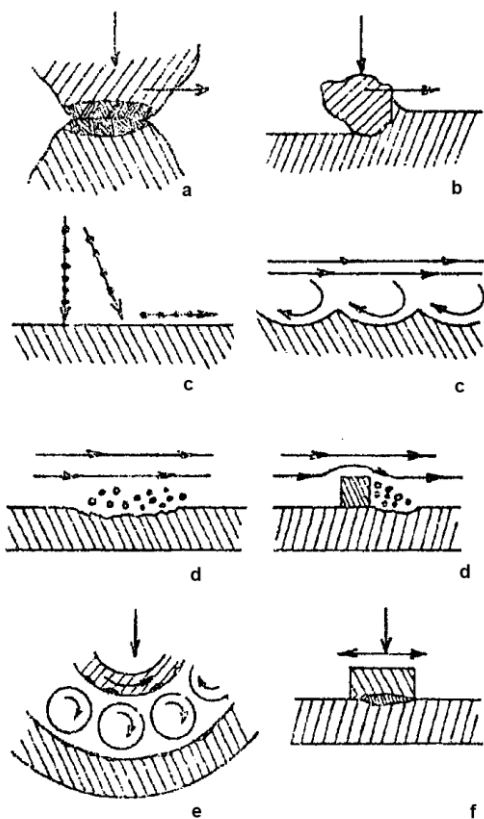
Aby bylo možné provést metalografické zkoumání materiálu, je nutné vykonat přípravu metalografického vzorku, který je následně posuzován. Vzorek by měl věrně reprezentovat vlastnosti dílu, ze kterého byl odebrán. Příprava vzorku se skládá z několika dílčích operací, z nichž každá může při špatném provedení změnit vlastnosti vzorku, nebo jej případně úplně znehodnotit.

Cílem této práce je určit, do jaké míry se změni vlastnosti vzorků z indukčně povrchově kalené a cementované oceli při změně vybraných parametrů abrazivního dělení vzorků. Konkrétně jde o změnu chlazení řezu a použití řezných kotoučů s odlišnou tvrdostí pojiva.

2 Technologické a užité vlastnosti cementovaných a povrchově kalených vrstev

2.1 Účel cementace a povrchového kalení

Smyslem technologií cementace a povrchového kalení ocelí je vytvoření tvrdé povrchové vrstvy o hloubce řádově desetin až jednotek milimetrů. Zároveň v jádře součásti zůstává houževnatá struktura. Takto upravené díly jsou díky tvrdému povrchu odolné proti povrchovému opotřebení (viz obr. 1), a současně kvůli houževnatosti jádra dobře zvládají zejména dynamické namáhání (na rozdíl od objemově kalených výrobků, které mají tvrdou, křehkou strukturu v celém objemu, a jsou tak při dynamickém namáhání náchylnější na vznik a šíření trhlin). Takové vlastnosti jsou často požadovány např. u ozubených kol, řetězových kol, čepů, trysek apod.



Opotřebení je degradační provozní proces, který je definován jako trvalá, nežádoucí změna povrchu materiálu mechanickými účinky (popř. doprovázenými účinky fyzikálními či chemickými). Odhadem 50 až 80 % všech poruchových prostojů strojů a zařízení je zapříčiněno opotřebením.¹

Obr. 1 Druhy opotřebení

(zdroj: PTÁČEK a kol. *Nauka o materiálu II.*)

- a) *adhezivní* (např. čep a kluzné ložisko)
- b) *abrazivní* (např. zuby rypadel)
- c) *erozivní* (např. lopatky turbín)
- d) *kavitační* (např. trysky)
- e) *únavové* (např. valivá ložiska)
- f) *vibrační* (např. hřídele)

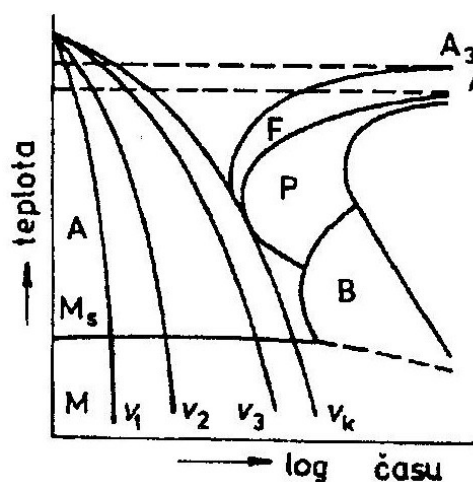
¹ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu II.* 2002. str. 335

2.2 Principy cementace a povrchového kalení

V obou případech se výsledná vysoká tvrdost získává kalením, tj. řízenými tepelnými cykly způsobujícími fázové a strukturní změny v pevném skupenství, které mají za následek vznik nerovnovážné martenzitické struktury. Tvrdost této struktury je dána přesycením uhlíkem a vysokou hustotou mřížkových poruch.

Schopnost oceli dosáhnout martenzitické struktury se nazývá kalitelnost. Schopnost materiálu získat tímto způsobem tvrdost se označuje zakalitelnost. Obě tyto materiálové charakteristiky závisí především na obsahu uhlíku v materiálu, ale i na obsahu dalších prvků a na parametrech ohřevu a ochlazování.

Kalení se vždy skládá z austenitizace, tj. difuzní změny feriticko-cementitické struktury na austenit, z ohřevu na kalicí teplotu a rychlého ochlazení rychlostí vyšší než *martenzitickou horní kritickou rychlostí*. Přitom dochází k anizotermickému rozpadu austenitu (zkráceně ARA). Při poklesu pod teplotu M_s dochází k bezdifuzní přeměně austenitu na martenzit (kromě martenzitu ve struktuře navíc vždy zůstává zbytkový austenit). Rychlosti ochlazování, teploty a doby přeměn se vyznačují v ARA (angl. CCT) diagramu. Na obr. 2 je příklad ARA diagramu pro podeutektoidní složení oceli (pro nadeutektoidní složení nahrazuje teplotu A_3 teplota A_{cm} a oblast feritické přeměny se mění na oblast vylučování sekundárního cementitu).



Obr. 2 ARA diagram
(zdroj: PTÁČEK a kol. *Nauka o materiálu II.*)

- A – oblast austenitu
- F – oblast feritické přeměny
- P – oblast perlitické přeměny
- B – oblast bainitické přeměny
- M_s – teplota počátku martenzitické přeměny
- v_k – kritická ochlazovací rychlost
- $v_{1,2,3}$ – ochlazovací rychlosti

Po zakalení vždy následuje nízkoteplotní popouštění, tj. ohřev na cca 150 až 200 °C, výdrž na této teplotě 1 až 2 hodiny a následné pomalé ochlazení. Výsledkem je snížení vnitřních pnutí a stabilizace struktury.²

² PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu II.* 2002. str. 104

2.2.1 Cementace

Jedná se o chemicko-tepelné zpracování. V materiálu se pozměňuje chemické složení a následně se mění struktura kalením. Nejdříve se povrchová vrstva sytí uhlíkem pro zvýšení kalitelnosti. Pro cementování se používají oceli s obsahem uhlíku v rozmezí 0,1 až 0,25 hm. %, a jsou tedy samy špatně zakalitelné. Syčení povrchu uhlíkem se provádí difuzí za zvýšené teploty (vždy nad A_3) z vhodného prostředí, a to buď pevného (prášku), kapalného, plynného nebo plazmy. Volba prostředí a teploty ovlivňuje kromě jiného také hloubku nasycené vrstvy (obvykle 0,5 až 2 mm) a dobu nauhličování (řádově několik hodin). Koncentrace uhlíku v nauhličené vrstvě se směrem od povrchu snižuje zhruba od 0,8 až 1 hm. % do původní hodnoty. Kvůli těmto rozdílům ve složení jsou v různých hloubkách odlišné kalicí teploty a následně i rozdílné struktury a tvrdosti po zakalení. Výsledná struktura a mechanické vlastnosti jsou tak ovlivněny i volbou způsobu zakalení.

Některé způsoby kalení po nauhličení a výsledné struktury jsou:

- *přímo z cementační teploty*: vzniká hrubý martenzit v povrchu i jádře, vysoká vnitřní pnutí
- *s příchazením*: z cementační teploty se ochlazuje na kalicí teplotu povrchu (obvykle 750 až 780 °C), po zakalení hrubá martenzitická struktura, nižší vnitřní pnutí
- *na jádro nebo na povrch*: ochlazením pod A_1 (na zhruba 600 °C) a novým ohřevem na kalicí teplotu jádra (nad A_3), nebo povrchu (nad A_1) se dosáhne zjemnění zrna
- *dvojitě*: kalí se nejdříve z teploty nad A_3 a poté znovu z teploty nad A_1 , získá se jemný martenzit v povrchu a feriticko-cementitická struktura v jádře

Po provedení nízkoteplotního popuštění může mít povrchová tvrdost hodnotu až 800 HV a směrem do jádra klesá.³

³ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2002. str. 101 až 103

2.2.2 Povrchové kalení

Na rozdíl od cementace jde pouze o tepelné zpracování. Při povrchovém kalení se nemění chemické složení materiálu a vysoké tvrdosti povrchu se dosahuje pouze fázovou transformací při prudkém ochlazení z kalicí teploty. Pro toto zpracování se tedy hodí dobře kalitelné oceli uhlíkové či nízkolegované, zpravidla podeutektoidního složení s obsahem uhlíku vyšším než 0,35 hm. %. Podle požadavků na mechanické vlastnosti jádra se materiál před povrchovým kalením často zpracovává buď normalizačním žíháním (čímž dojde ke zjemnění stávající feriticko-perlitické struktury), nebo pro značně namáhané součásti zušlechťováním (vzniká jemná feriticko-cementitická struktura sorbit, která je pevná a zároveň houževnatá).

Princip povrchového kalení spočívá v austenitizaci a následném zakalení pouze povrchové vrstvy. Jádro součásti tak zůstává ve stejném stavu, jako před kalením (na rozdíl od cementace). Aby toho bylo možné dosáhnout, tak rychlost ohřevu musí nabývat hodnot řádově několik stovek °C/s (hloubka kalené vrstvy je přitom nepřímě úměrná této rychlosti). Vysoká rychlost ohřevu zvyšuje teplotu přeměny perlitu na austenit asi o 200 °C oproti běžnému kalení. Zároveň se zrychluje nukleace austenitu, což vede ke zjemnění struktury. Martenzit vzniklý po povrchovém kalení je díky zjemnění tvrdší a houževnatější v porovnání s běžným kalením.

Hloubka kalené vrstvy závisí na použité technologii a době ohřevu:

- *indukční ohřev vířivými proudy*: hloubka vrstvy 1 až 6 mm
- *ohřev plamenem*: hloubka vrstvy minimálně 1,5 až 3 mm
- *ohřev laserem*: hloubka vrstvy od 0,2 do 0,8 mm

V důsledku teplotního gradientu a strukturní nehomogenity vzniká v materiálu pnutí, které se odstraňuje nízkoteplotním popouštěním. Výsledná tvrdost závisí hlavně na obsahu uhlíku v oceli a směrem od povrchu se snižuje.⁴

⁴ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2002. str. 98 až 101

3 Metody hodnocení cementovaných a povrchově kalených vrstev

Základními parametry zjišťovanými při metalografickém zkoumání cementovaných či povrchově kalených ocelí jsou tvrdost a její průběh pomocí vnikacích (indentačních) zkoušek, z čehož lze určit hloubku prokalené vrstvy. Tyto vlastnosti definují schopnost materiálu odolávat povrchovému opotřebení. Kromě toho se také provádí pozorování světelným (optickým) mikroskopem pro zkoumání struktury a případných defektů.

3.1 Světelná mikroskopie

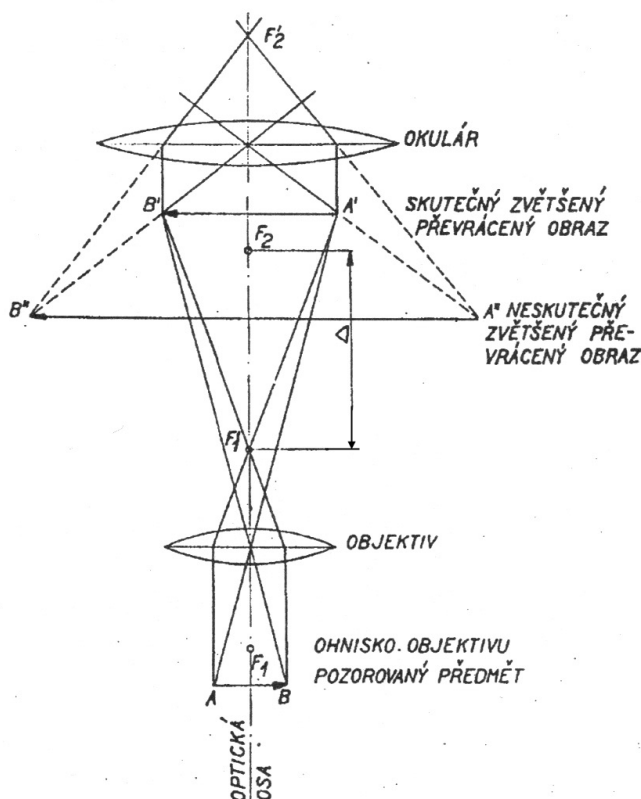
Pomocí světelné mikroskopie lze provést přímé pozorování struktury materiálu. Struktura oceli je komplex několika fází. Pozorováním vhodně preparovaného metalografického vzorku lze určit druh, množství, tvar, způsob vyloučení a vzájemné uspořádání fází v materiálu, a tak odvodit jeho technologické a užitné vlastnosti. Také se využívá pro měření charakteristických rozměrů vtisků při zkouškách tvrdosti podle Brinella, Vickerse a Knoopu.

Světelná mikroskopie využívá pro zobrazení obrazu viditelné světlo, tedy elektromagnetické záření o vlnové délce v rozsahu přibližně $\lambda = 0,35$ až $0,75 \mu\text{m}$. Hlavními součástmi světelného mikroskopu jsou dvě soustavy čoček: *objektiv* a *okulár*. Zjednodušené schéma jejich uspořádání a průchodu světelných paprsků odražených od pozorovaného předmětu je na obr. 3. Pozorovaný předmět AB se nachází před předmětovým ohniskem objektivu F_1 , přitom vzdálenost od ohniska musí být menší než je ohnisková vzdálenost objektivu f_{ob} . Tak vznikne skutečný zvětšený převrácený obraz A'B' mezi okulárem a jeho předmětovým ohniskem F_2 (vzdálenost od okuláru je tedy menší, než jeho ohnisková vzdálenost f_{ok}), a ten je okulárem zobrazen jako ne skutečný zvětšený převrácený obraz A''B'', který je nakonec pozorován okem nebo kamerou. Celkové zvětšení mikroskopu je součinem zvětšení objektivu a okuláru.⁵

Běžné zvětšení optických metalografických mikroskopů se pohybuje od 50 do 1000x, případně vyšší při použití speciálních metod (olejová imersní metoda).⁶

⁵ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 371 až 372

⁶ ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*. [Online] 2011. str. 143



Obr. 3 Zjednodušené schéma průchodu paprsků metalografickým mikroskopem

(zdroj: PTÁČEK a kol. *Nauka o materiálu I.*)

F_1, F_2 – předmětová ohniska

F'_1, F'_2 – obrazová ohniska

Δ – optická délka tubusu mikroskopu

Vzhledem k tomu, že objektiv zvětšuje přímo předmět a okulár pouze obraz vytvořený objektivem, je schopnost rozlišení detailů dána právě objektivem. Užitečné zvětšení mikroskopu je omezené *minimální rozlišitelnou vzdáleností* (rozlišovací schopností) objektivu d_{min} . To je nejmenší vzdálenost mezi dvěma body na pozorovaném předmětu, při které ještě lze tyto body od sebe zřetelně rozlišit. Tato

vzdálenost je přímo úměrná vlnové délce λ světla osvětlujícího vzorek a nepřímo úměrná *číselné (numerické) apertuře* objektivu A .⁷ Číselná apertura charakterizuje schopnost objektivu zachytovat světlo a závisí na polovičním úhlu vstupu světla do objektivu α (viz obr. 4) a indexu lomu mezi prostředím (médii) před objektivem a čelní čočkou objektivu n . Suché objektivы používají jako médium vzduch ($n_{vzduch}=1$). Olejové imersní objektivы využívají jako médium speciální olej, který má hodnotu indexu lomu 1,5 a tak zlepšuje rozlišovací schopnost objektivu.⁸

Vztah pro číselnou aperturu:

$$A = n \cdot \sin \alpha \quad [-]$$

Vztah pro minimální rozlišitelnou vzdálenost ve světlém poli:

$$d_{min} = \frac{\lambda}{A} \quad [\mu m]$$

Vztah pro minimální rozlišitelnou vzdálenost v tmavém poli:

$$d_{min} = \frac{\lambda}{2A} \quad [\mu m]$$

Pozorování v optickém mikroskopu kromě rozlišovací schopnosti omezuje také *hloubka ostrosti* objektivu H , tedy vzdálenost mezních rovin, ve kterých je předmět ostře viditelný. Podle obr. 4 závisí hloubka ostrosti na d_{min} a na α podle vztahu:

$$H = \frac{d_{min}}{\tan \alpha} \quad [\mu m]^9$$

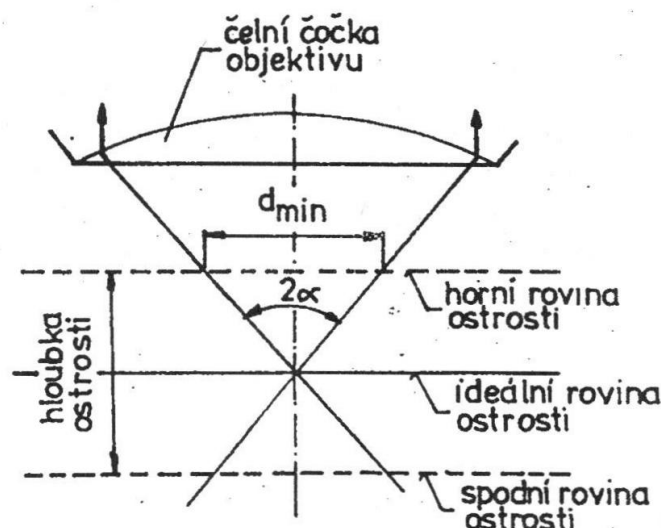
⁷ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I.* 2003. str. 372

⁸ ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*. [Online] 2011. str. 144

⁹ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I.* 2003. str. 372 až 373

Běžné hodnoty d_{min} suchých objektivů se pohybují okolo 0,4 až 10 μm , což postačuje k pozorování detailů na úrovni krystalického zrna. Hloubka ostrosti H se může pohybovat řádově v jednotkách nebo desetinách μm .¹⁰ Aby byl výsledný obraz ostrý, musí být reliéf pozorovaného povrchu nižší než hloubka ostrosti objektivu.

Obr. 4 Hloubka ostrosti objektivu
(zdroj: PTÁČEK a kol. *Nauka o materiálu I.*)



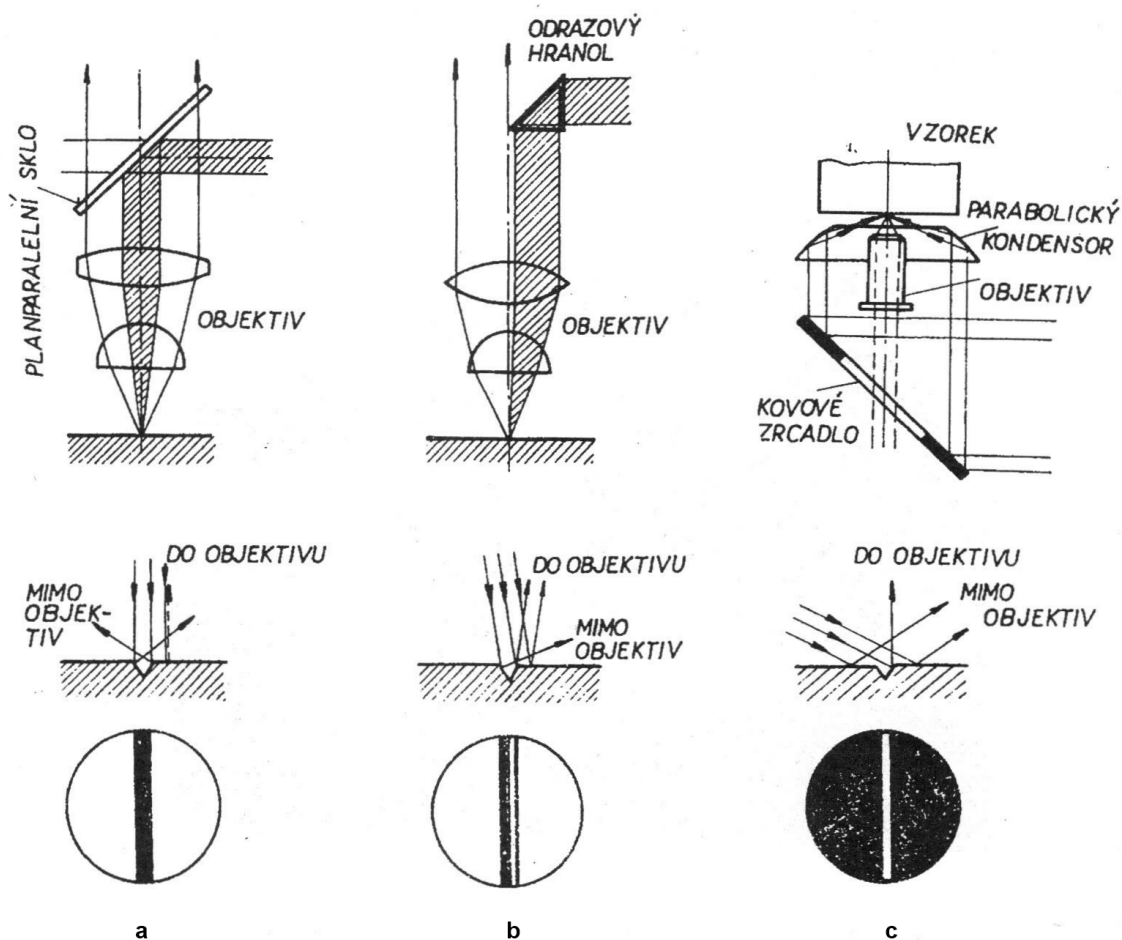
K získání kvalitního obrazu je potřeba dostatečný kontrast. Toho se dosahuje vhodnou přípravou metalografického vzorku (viz kapitola 4 Příprava metalografických vzorků) a také správnou volbou optické metody. Optické metody se liší ve způsobu osvětlení vzorku.

Nejčastější způsoby osvětlení vzorku při pozorování ocelí jsou znázorněny na obr. 5:

- a) **Světlé pole, kolmé osvětlení:** světlo z externího zdroje (iluminátoru) se odráží od planoparalelního skla, prochází objektivem a dopadá kolmo na rovinu vzorku. Od ploch kolmých na dopadající paprsky se světlo odráží zpět do objektivu (světlé roviny) a od šikmých ploch se odráží mimo objektiv (tmavá místa, např. hranice zrn).
- b) **Světlé pole, šikmé osvětlení:** světlo opět přichází ke vzorku skrz objektiv, ale na povrch dopadá šikmo, takže se se částečně odráží zpět i od šikmých ploch. Dosahuje se tak vyššího kontrastu a prostorového vjemu obrazu. Může být buď jednostranné pomocí odrazového hranolu (na obr. 5), nebo všestranné při použití prstencové clony.
- c) **Tmavé pole:** světlo ze zdroje přichází mimo objektiv a díky parabolickému kondenzoru dopadá na vzorek šikmo a všestranně symetricky k ose objektivu. Do objektivu se odráží paprsky jen od šikmých ploch, které tak jsou vidět světle ve tmavém poli.¹¹

¹⁰ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I.* 2003. str. 374

¹¹ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I.* 2003. str. 375 až 377



Obr. 5 Schéma osvětlení metalografických vzorků
(zdroj: PTÁČEK a kol. *Nauka o materiálu I.*)

- a – světlé pole, kolmé osvětlení
- b – světlé pole, jednostranné šikmé osvětlení
- c – tmavé pole

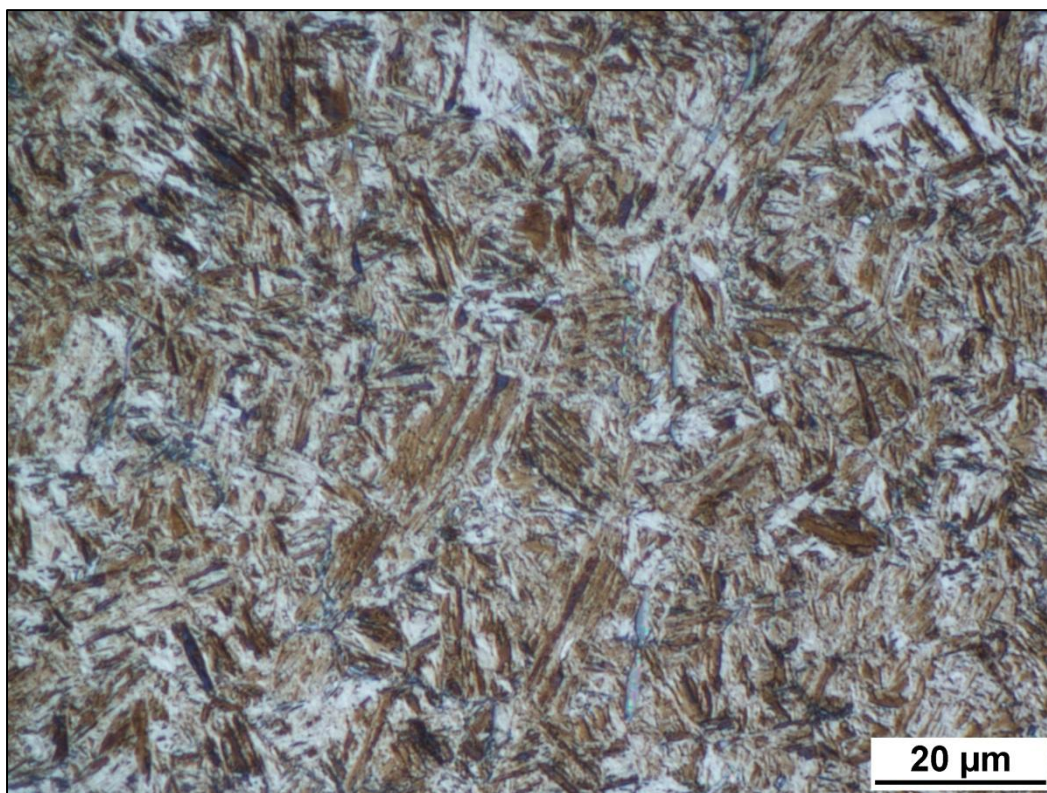
Metalografické mikroskopy bývají obvykle invertované (viz obr. 6). To znamená, že objektiv se nachází pod vzorkem. Výhodou invertovaných mikroskopů je možnost pozorování větších vzorků, na rozdíl od přímých mikroskopů, u kterých je velikost vzorku omezena vzdáleností objektivu od základny mikroskopu.¹²

Na obr. 7 je fotografie martenzitické struktury oceli 12 040 pořízená na optickém mikroskopu při 1000x zvětšení a osvětlením ve světlém poli.

¹² *Inverted metallurgical microscopes.* [Online]



Obr. 6 Invertovaný metalografický mikroskop
(zdroj: ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*.)



Obr. 7 Martenzitická struktura při 1000x zvětšení ve světlém poli
(zdroj: archiv autora)

3.2 Měření tvrdosti

Tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Většina měřících přístrojů pracuje s touto definicí. Hodnoty tvrdosti se uvádí obvykle bez jednotek, značí se písmenem H (z angl. hardness) doplněným informacemi o použité měřicí metodě. Existují zkoušky *vrypové*, *odrazové* a *vnikací*. Pro měření tvrdosti ocelí se téměř výhradně používají zkoušky vnikací (indentační), které spočívají v zatlačení zkušební tělesa (indentoru) do vzorku a změření charakteristického rozměru vtisku vzniklého plastickou deformací vzorku. Přitom indenter musí mít výrazně vyšší tvrdost, než zkoušený materiál. Nejpoužívanější vnikací metody jsou *Brinell*, *Rockwell*, *Vickers* a *Knoop*.¹³

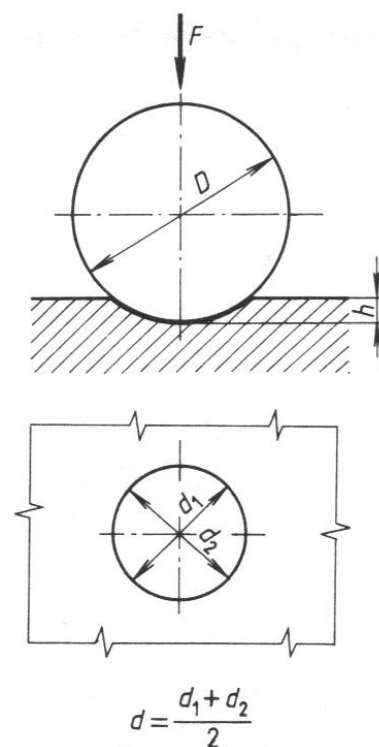
Zkouška tvrdosti podle Brinella

Je dána normou ČSN EN ISO 6506 – 1, 2, 3. Indentor má tvar koule o průměru od 1 do 10 mm a je vyroben z kalené oceli (tvrdost HB) nebo tvrdokovu (obvykle z karbidu wolframu, tvrdost HBW). Za velikost vtisku se považuje jeho průměr d (viz obr. 8). Výsledná tvrdost se určuje z tabulek nebo se počítá přes vzorec zohledňující velikost zatížení F [N], průměr zkušební kuličky D [mm] a vtisku d [mm].¹⁴

Kvůli velikosti zkušební tělesa se Brinellova zkouška používá hlavně u silně heterogenních nebo hrubozrných materiálů, např. litin nebo objemově za tepla tvářených ocelí. Pro měření tvrdosti cementovaných a povrchově kalených ocelí se nehodí.¹⁵

Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Je normalizována podle ČSN EN ISO 6508 – 1, 2. Jako indenter se používá buď diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo kulička z tvrdokovu. Zkouška probíhá tak, že se nejprve



Obr. 8 Zk. tvrdosti Brinell
(Zdroj: HLUCHÝ a KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1, 1. díl.*)

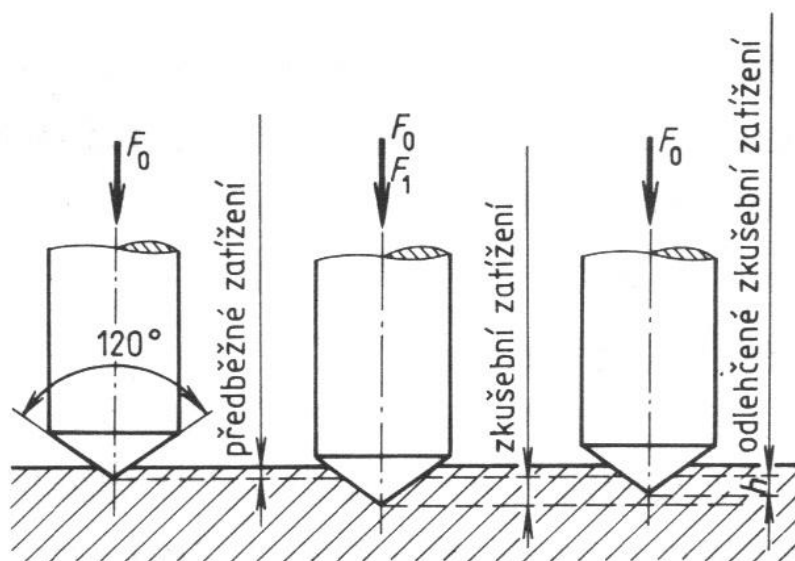
¹³ HLUCHÝ a KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1, 1. díl. Nauka o materiálu*. 2002. str 105

¹⁴ HLUCHÝ a KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1, 1. díl. Nauka o materiálu*. 2002. str 106 až 107

¹⁵ LINDEGREN, Maria. *Hardness Testing and Specimen Preparation*. [Online] 2010. str. 4

provede předběžné zatížení F_0 , které se na určitou dobu zvýší o přídavné zatížení F_1 , a poté zase sníží na hodnotu předběžného zatížení, při kterém se nakonec odečítá hloubka vtisku h (viz obr. 9), popř. měřicí zařízení přímo zobrazuje hodnotu tvrdosti HRX (kde X nahrazuje značka stupnice, která je dána použitým vnikacím tělesem a zatížením).¹⁶

Díky předběžnému zatížení může indentor proniknout např. vrstvou nečistot na povrchu, která pak nemá vliv na výsledek měření. Proto je Rockwellova zkouška nejméně náročná na přípravu povrchu. Pro svou jednoduchost a rychlost se často používá pro běžnou kontrolu výrobků v kalírnách.¹⁷



Obr. 9 Zk. tvrdosti Rockwell (indentor diamantový kužel)
(Zdroj: HLUCHÝ a KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1, 1. díl.*)

Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Je stanovena normou ČSN EN ISO 6507 – 1, 2. Vnikací těleso je diamantový jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° . Zkouška se provádí zkušebním zatížením F po stanovenou dobu (zpravidla 10 až 15 s) a po odlehčení se měří úhlopříčky vtisku u_1 a u_2 (příp. d_1 a d_2), ze kterých se vypočítá aritmetický průměr délky úhlopříčky vtisku d (viz obr. 10).¹⁸

Pro výpočet Vickersova čísla tvrdosti platí vztah: $HV = 1,854 \frac{F}{d^2} [\text{kp/mm}^2]$ ¹⁹

F – zkušební zatížení [kp] (1kp = 9,81N)

d – průměr z úhlopříček vtisku [mm]

¹⁶ HLUCHÝ a KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1, 1. díl. Nauka o materiálu*. 2002. str 108 až 111

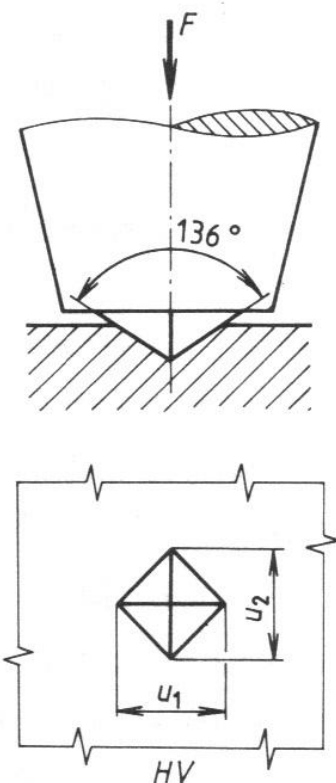
¹⁷ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 453

¹⁸ HLUCHÝ a KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1, 1. díl. Nauka o materiálu*. 2002. str 111 až 112

¹⁹ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 452

Výhodou Vickersovy zkoušky je, že v širokém intervalu zatížení jsou vtisky geometricky podobné a výsledná veličina tak nezávisí na zatížení. Tato nezávislost umožňuje kromě standardního měření tvrdosti také měření *mikrotvrdosti*.²⁰

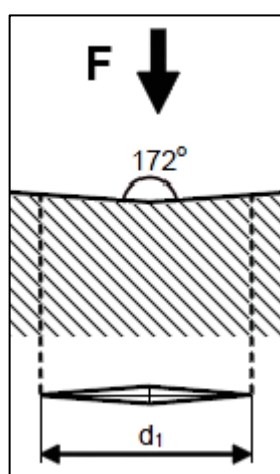
Při měření mikrotvrdosti se používá malá zatěžovací síla v rozsahu od 0,001 do 2 kp (cca 0,01 až 20 N). Tímto způsobem lze měřit tvrdost keramiky, jednotlivých fází materiálu, tenkých povlaků a v neposlední řadě také průběh tvrdosti u povrchově tepelně a chemicko-tepelně zpracovaných součástí.²¹



Obr. 10 Zk. tvrdosti Vickers
(Zdroj: HLUCHÝ a KOLOUCH.
Strojírenská technologie 1, 1. díl.)

Zkouška tvrdosti podle Knoop

Řídí se normou ČSN EN ISO 4545. Podstata měření je obdobná, jako u metody Vickers, ale liší se v použitém indentoru. Tím je v tomto případě diamantový čtyřboký jehlan s obdélníkovou základnou a vrcholovými úhly 172° a 130° . Používá se výhradně pro měření mikrotvrdosti velmi tvrdých materiálů, a to z důvodu menší (přibližně poloviční) hloubky vtisku v porovnání s metodou Vickers. Výhodou je také to, že se měří velikost pouze delší úhlopříčky vtisku d_1 (viz obr. 11), která je oproti Vickersovi asi 3x delší, a tak klesá chyba měření. Nevýhodou metody Knoop



je náročnost na přípravu povrchu vzorku právě kvůli malé hloubce vtisku. Knoopovo tvrdostní číslo HK se rovná poměru zatížení k ploše průmětu vtisku.²²

Obr. 11 Zk. tvrdosti Knoop
(Zdroj: LINDEGREN, M. *Hardness Testing and Specimen Preparation.*)

²⁰ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 452

²¹ ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*. [Online] 2011, str. 170

²² LINDEGREN, Maria. *Hardness Testing and Specimen Preparation*. [Online] 2010. str. 5

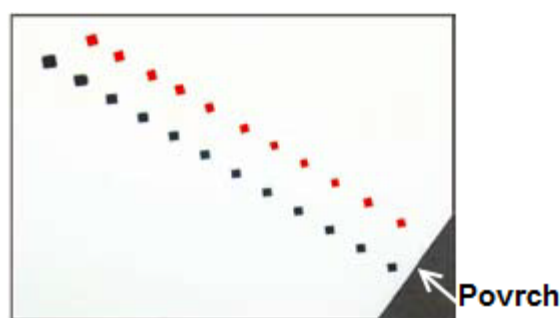
3.2.1 Měření tvrdosti povrchově tepelně zpracovaných ocelí

Pro tato měření platí norma ČSN EN ISO 2639. Zkouška se provádí za účelem vyhodnocení *hloubky prokalení CHD* (angl. case hardness depth), což je vzdálenost od povrchu součásti k *limitní tvrdosti HL* (angl. hardness limit). Měření se realizuje sérií vpichů postupně kolmo od povrchu směrem k jádru součásti.²³

Nejčastěji se využívá zkouška tvrdosti podle Vickerse v rozsahu mikrozatížení. Vtisky se mohou vytvářet buď v jedné řadě (obr. 12), nebo pro zvýšení počtu vtisků (a tím i přesnosti měření) ve dvou řadách systémem „cikcak“ (obr. 13). Na obrázcích je patrné postupné zvětšování plochy vtisku s rostoucí vzdáleností od povrchu zapříčiněné poklesem tvrdosti vzorku.

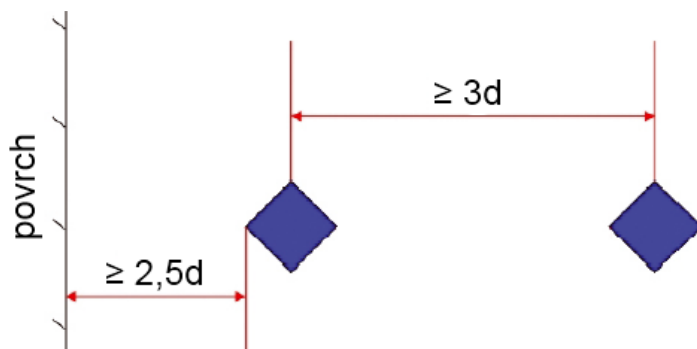


Obr. 12 Vickers měření CHD ve 2 řadách
(Zdroj: LINDEGREN, M. *Hardness Testing and Specimen Preparation*.)



Obr. 13 Vickers měření CHD ve 2 řadách
(Zdroj: LINDEGREN, M. *Hardness Testing and Specimen Preparation*.)

Pro správnost měření je důležité dodržet minimální vzdálenost mezi jednotlivými vpichy, jelikož v okolí vtisků dochází ke zpevnění plastickou deformací a při nedodržení minimální vzdálenosti by proto byla naměřena tvrdost vyšší než skutečná. Minimální vzdálenosti mezi vpichy závisí na druhu zkoušeného materiálu. Pro ocel platí hodnoty uvedené na obr. 14. Velikost diagonály vtisku d by nikdy neměla být menší než 20 μm kvůli přesnosti měření.²⁴



Obr. 14 Vickers min. vzdálenost vpichů
(Zdroj: LINDEGREN, M. *Hardness Testing and Specimen Preparation*.)

d – velikost úhlopříčky vtisku

²³ Struers A/S. *Case Hardness Depth (CHD) - Měření povrchové tvrdosti*. [Online] 2012.

²⁴ LINDEGREN, Maria. *Hardness Testing and Specimen Preparation*. [Online] 2010. str. 7 až 9

Stanovení limitní tvrdosti HL a způsob výpočtu hloubky prokalení CHD závisí na použitém procesu zušlechťení:

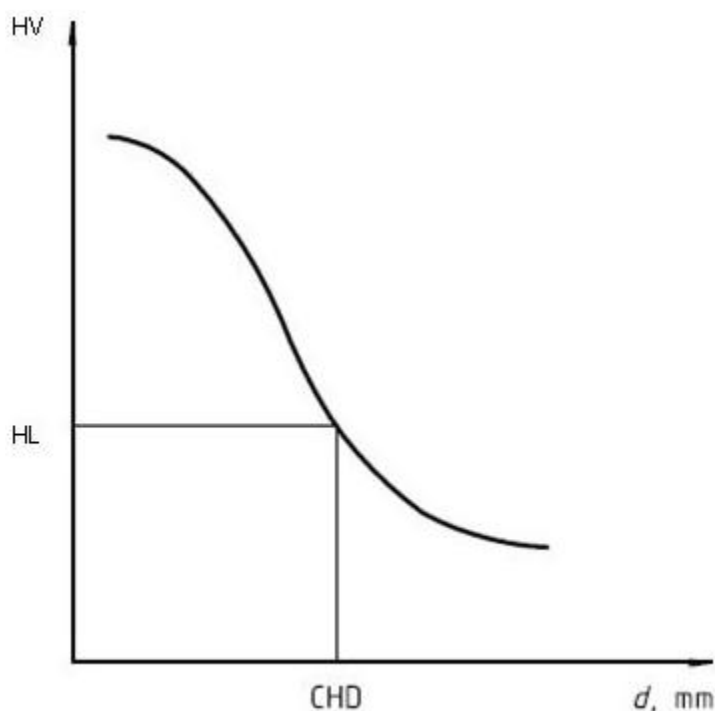
- **cementované díly:** $HL = 550 \text{ HV}$

Hloubka prokalené vrstvy CHD (E_{ht}) tedy odpovídá vzdálenosti od povrchu součásti do místa s tvrdostí 550 HV.

- **povrchově kalené díly:** $HL = 0,8 \times (\text{minimální}) \text{ povrchová tvrdost}$

Hloubka prokalené vrstvy CHD (R_{ht}) je v tomto případě vzdálenost od povrchu do místa, které má 80% tvrdost v porovnání s dolní hodnotou předepsanou na povrchu součásti.

Průběh tvrdosti v závislosti na hloubce je vynášen do grafu (obr. 15), ze kterého se podle dané limitní tvrdosti HL určí hloubka prokalení CHD.²⁵

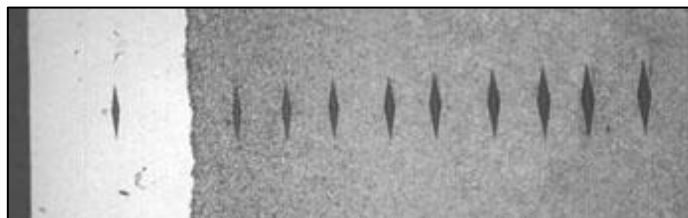


Obr. 15 Graf vývoje tvrdosti v závislosti na hloubce
(Zdroj: www.struers.cz)

d – vzdálenost vpichu od povrchu součásti

²⁵ Struers A/S. *Case Hardness Depth (CHD) - Měření povrchové tvrdosti*. [Online] 2012.

Pro měření CHD je možné rovněž použít Knoopovu zkoušku tvrdosti (obr. 16). I pro ni jsou stanoveny minimální vzdálenosti mezi vpichy, a to ve vztahu k velikosti kratší úhlopříčky d_2 . Konkrétně pro zkoušení oceli je to vzdálenost $\geq 3d_2$ od povrchu a $\geq 4d_2$ mezi dalšími jednotlivými vtisky.²⁶



Obr. 16 Knoop měření CHD

(Zdroj: ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*.)

Na obr. 17 je automatický tvrdoměr Struers DuraScan s možností měření mikro i makro tvrdosti dle Vickerse nebo Knoop a motorizovaným stolem pro plně automatické měření hloubky prokalení.



Obr. 17 Automatický tvrdoměr Struers DuraScan

(Zdroj: www.struers.cz)

²⁶ LINDEGREN, Maria. *Hardness Testing and Specimen Preparation*. [Online] 2010. str. 5

4 Příprava metalografických vzorků

Cílem preparace při zkoumání cementovaných a povrchově kalených ocelí je vytvoření takového vzorku, který je dostatečně kvalitní pro pozorování pomocí optické mikroskopie a který je vhodný pro měření průběhu povrchové tvrdosti. Zároveň musí hotový preparát reprezentovat vlastnosti původní struktury.

Ideální stav hotového metalografického vzorku je následující:

- bez deformace
- bez rýh
- bez výlomků
- bez cizích těles
- bez skvrn
- bez reliéfu nebo zaoblených hran
- bez tepelného poškození

Mechanickou přípravou takového stavu takřka nelze dosáhnout, ale lze vytvořit vzorek s minimálním poškozením, které při běžné metalografické kontrole není patrné. Tento téměř dokonalý stav se nazývá *pravá struktura*. Dosažení pravé struktury je finančně i časově náročné a pro většinu metalografických zkoušek zbytečné. V praxi je cílem získat přijatelný výsledek preparace, což znamená, že vzorek vyhovuje pro použité metalografické metody.

Dalším požadavkem na metalografickou přípravu vzorků je její reprodukovatelnost, čili že při zkoušení stejného materiálu připraveného daným postupem musí být výsledky kontroly vždy stejné.²⁷

Příprava metalografického vzorku se vždy skládá z *odběru (řezání)*, *zalévání*, *broušení* a ve většině případů i *leštění*. V případě potřeby se nakonec provádí *leptání*.

²⁷ Struers A/S. *Filozofie preparace*. [Online] 2012.

4.1 Odběr vzorků

Prvním krokem v procesu přípravy metalografického vzorku je jeho odběr a úprava rozměrů. Běžný výbrus mívá plochu cca 1 až 2 cm². Odebraný vzorek musí reprezentovat vlastnosti materiálu, ze kterého byl oddělen. To znamená, že během odběru nesmí v žádném případě dojít k *vyhřátí* materiálu, tj. ohřátí na takovou teplotu, při které by došlo ke změně struktury (teploty popouštění či fázových přeměn). Rovněž nesmí docházet k plastické deformaci vzorku kvůli změně mechanických vlastností. Vhodná metoda odběru zaručuje relativně rovný povrch s minimálním poškozením struktury. Existují tyto způsoby oddělování vzorků: *řezání*, *odfrézování*, *odlamování*, *elektrojiskrové řezání*, *řezání plamenem* a *řezání elektrickým obloukem*.²⁸

Nejpoužívanějším způsobem odběru vzorků je ***abrazivní řezání za mokra***, protože je poměrně rychlé a zanechává do materiálu pouze malá poškození. Pro tento způsob dělení materiálu se používá řezný kotouč sestávající se z brusného prostředku a pojiva, na který je v místě řezu přiváděna chladicí kapalina (viz obr. 18).²⁹

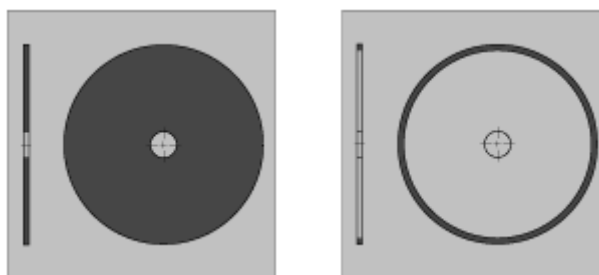


Obr. 18 Kotouče a chladicí kapaliny pro abrazivní řezání
(zdroj: ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*.)

²⁸ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 378

²⁹ Struers A/S. *O řezání*. [Online] 2012.

Volba řezného kotouče do značné míry ovlivňuje náklady nejen na oddělení vzorku (čas potřebný k řezání, trvanlivost kotouče), ale i náklady na celou preparaci, jelikož kvalitní řez snižuje čas potřebný pro následné broušení. Pro řezání železných kovů o tvrdosti asi do 700 HV jsou nejosvědčenější kotouče s brusivem z oxidu hlinitého (Al_2O_3) v pryskyřičném (bakelitovém) pojivu, případně pro materiály s vyšší tvrdostí (až do 1400 HV) se používají kotouče s brusivem z kubického nitridu bóru (CBN) v pryskyřičné (bakelitové) vazbě. Pryskyřice umožňuje uvolňování opotřebovaného brusiva, zatímco se na povrch kotouče dostává nové brusivo (probíhá tzv. *samoostření kotouče*). Kromě materiálu se kotouče liší i konstrukcí, jak je vidět na obr. 19. Kotouče s brusivem Al_2O_3 jsou pro krátkodobé použití, protože se rychleji opotřebovávají, ale jsou levnější a brusivo pokrývá celý povrch kotouče. Kotouče s brusivem CBN jsou pro dlouhodobé použití, jsou dražší, ale mnohem trvanlivější a brusivo je nanášeno pouze po obvodu.³⁰



Obr. 19 Konstrukce kotouče pro krátkodobé (vlevo) a dlouhodobé (vpravo) použití
(Zdroj: www.struers.cz)

Hlavním účelem použití chladicí (řezné) kapaliny je zabránit vyhřátí vzorku a následné změně struktury fázovou přeměnou nebo rozpadem nerovnovážných fází. Kapalina jednak snižuje tření a také sama odvádí přebytečné teplo. Kromě toho čistí místo řezu od třísek a opotřebovaného brusiva, což má příznivý vliv na kvalitu povrchu vzorku. Chladicí kapalina, pokud je hořlavá, musí mít relativně vysoký bod vzplanutí, jelikož při abrazivním řezání vznikají jiskry.³¹

³⁰ Struers A/S. *O řezání*. [Online] 2012.

Struers A/S. *Cut-off wheels*. [Online] 2010.

³¹ ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic handbook*. [Online] 2011. str. 32

4.2 Označování vzorků

Metalografické vzorky je potřeba přehledně označovat, aby bylo jasné patrné, ze kterého výrobku a z jakého místa byly odebrány. Provádí se např. razidly, popisem elektrickou jiskrou, nebo zalitím značky spolu se vzorkem.³²

4.3 Zalévání vzorků

Vzorky se zalévají z několika důvodů, ale při použití vhodné metody vždy dochází ke zlepšení výsledků preparace. Se zalitým vzorkem se snadněji manipuluje, zvláště pak pokud je malých rozměrů. Dále válcový tvar a jeho shodný průměr u několika vzorků usnadňuje upínání pro automatické broušení a leštění, a to i více vzorků najednou. Navíc zalévací hmota chrání hrany vzorku během broušení a leštění. Postupy pro zalévání se dělí podle způsobu vytvrzení zalévací hmoty na dvě hlavní skupiny: *zalévání za studena* a *(tlakové) zalévání za tepla*. V každém případě musí být vzorek před zalitím očištěný a odmaštěný, aby došlo k co nejlepší adhezi mezi vzorkem a zalévací hmotou.³³

4.3.1 Zalévání za studena

Zalévací hmota (pryskyřice) se před použitím namíchá v přesném poměru z několika komponent, obvykle ze dvou kapalin, nebo kapaliny a prášku. Vzorek vložený v zalévací formě je vzápětí zalit touto směsí, ve které probíhá polymerizace a dochází k jejímu ztuhnutí. Doba tuhnutí závisí na druhu použitého zalévacího materiálu a pohybuje se v rozmezí od 10 minut do 12 hodin. Používají se dva druhy pryskyřic, a to *epoxidová* a *akrylová*.³⁴

Epoxidová pryskyřice (obr. 20) vykazuje nejmenší smrštění ze všech pryskyřic pro zalévání za studena. Doba vytvrzování je relativně dlouhá, ale výsledkem je vynikající přilnavost ke většině materiálů. Navíc lze zvýšit její tvrdost působením tepla. Vytvrzená epoxidová pryskyřice dobře odolává teple a chemikáliím. Díky nízké viskozitě je vhodná pro vakuovou

³² PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 379

³³ Struers A/S. *O zalévání*. [Online] 2012.

PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 379

³⁴ Struers A/S. *O zalévání za studena*. [Online] 2012.

impregnaci, což je technika zalévání porézních materiálů. Použití epoxidové pryskyřice je běžné u porézních materiálů a také u všech vzorků, kde je požadována kvalitní ochrana hran.

Akrylová pryskyřice (obr. 21) má na rozdíl od epoxidové kratší dobu vytvrzování, ale větší míru smrštění. Vytvrzování se provádí přidáním katalyzátoru. Akrylová pryskyřice je termoplastická a dobře chemicky odolná. Její použití je univerzální.³⁵



Obr. 20 Kuličkové ložisko v epoxidové pryskyřici
(Zdroj: Struers A/S. *Cold mounting.*)



Obr. 21 Vzorky v akrylové pryskyřici
(Zdroj: Struers A/S. *Cold mounting.*)

4.3.2 Tlakové zalévání za tepla

Tlakové zalévání za horka se vyznačuje tím, že pro úspěšné zalití vzorku musí být zalévací hmota vystavena zvýšené teplotě a tlaku. K tomuto účelu se používají metalografické zalévací lisy (viz obr. 22). Zalévacím materiálem jsou buď tzv. **duroplasty**, což jsou pryskyřice vytvrdivelné teplem, nebo **termoplastické pryskyřice**,



Obr. 22 Zalévací lis Struers CitoPress
(Zdroj: www.struers.cz)

které lze teplem tavit. Moderní lisy bývají vybaveny vodním chlazením objímk se vzorky za stálého působení tlaku. Díky tomu je výsledné smrštění pryskyřice minimální a zachovává se vynikající přilnavost ke vzorku. Parametry procesu udávané firmou Struers jsou: teplota 180°C, tlak dle zalévací hmoty až 350 bar, celková doba zalévání i s chlazením mezi 5 a 13,5 minutami podle druhu hmoty a velikosti vzorku. Výhodami zalévání za tepla jsou oproti zalévání

³⁵ Struers A/S. *O zalévání za studena*. [Online] 2012.

za studena kratší procesní doba, vyšší kvalita, stejnoměrnost vzorků a levnější zalévací hmoty. Naopak nevýhodou jsou pořizovací náklady na zalévací lis a z toho plynoucí omezení počtu simultánně připravovaných vzorků.³⁶

4.4 Broušení a leštění vzorků

Správně připravený metalografický vzorek musí mít dokonale rovný povrch s rovnoměrnou a minimální drsností. Toho se dosahuje broušením a následným leštěním povrchu vzorku. Nejčastěji se tyto operace provádí *mechanicky*, přičemž se musí opět věnovat pozornost případnému vyhřátí vzorku. Méně rozšířené jsou *elektrolytické*, *chemické* či *kombinované* broušení a leštění.³⁷

4.4.1 Mechanické broušení

Účelem broušení je odstranění vrstvy materiálu poškozené během řezání. Úběr materiálu se děje pomocí zrn brusiva uložených v prostředí tuhém (brusné papíry), polotuhém (brusné pasty) nebo kapalném (brusné suspenze). V současnosti se obvykle brousí za mokra, tj. s použitím chladicí vody, protože je to rychlejší a čistší metoda a dochází k menšímu ovlivnění struktury díky chlazení a odplavování obrusu. Broušení může být ruční nebo automatizované.

Ruční broušení se provádí postupně na několika kotoučích, přičemž klesá velikost brusiva od cca 63 až k 1 μm . Během broušení se vzorkem nehýbe, při přechodu na jemnější brusivo se očistí, otočí o 90° a brousí, dokud nezmizí stopy po předchozím broušení.

Automatické broušení se obvykle skládá ze dvou procesů, a to z *rovinného broušení* a z *jemného broušení*. Rovinné broušení garantuje podobný rovný povrch všech vzorků bez ohledu na předchozí zpracování. Při jemném broušení se používá brusivo o velikosti přibližně 5 μm . Díky tomu se dosahuje povrch s minimální deformací odstranitelnou leštěním.³⁸

³⁶ Struers A/S. *O zalévání*. [Online] 2012.

Struers A/S. *O zalévání za horka*. [Online] 2012.

Struers A/S. *Application guide for hot mounting*. [Online] 2010.

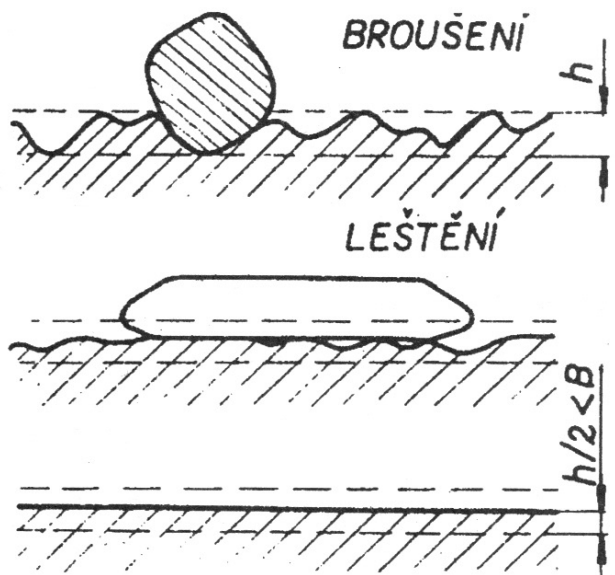
³⁷ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 379 až 380

³⁸ Struers A/S. *O broušení a leštění*. [Online] 2012.

PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 379 až 380

4.4.2 Mechanické leštění

Leštění vzorku je operace, která následuje po broušení za účelem dosažení co nejlepšího povrchu vzorku. Především jde o srovnání reliéfu a odstranění rýh, jež mohly vzniknout během mechanického broušení. Hlavní rozdíl mezi mechanickým broušením a mechanickým leštěním je ten, že během mechanického leštění nedochází k úběru materiálu, nýbrž pouze k vyrovnaní reliéfu povrchu plasticou deformací. Tímto způsobem vzniká tzv. *Beilbyova vrstva* (viz obr. 23). Mechanické leštění se provádí pomocí leštícího prostředku naneseného na litinový kotouč, případně kotouč potažený tkaninou. Leštícím prostředkem bývá suspenze z částic oxidu hlinitého nebo diamantu s vodou, olejem nebo alkoholem, a to ve formě leštící pasty nebo spreje.³⁹



Obr. 23 Beilbyova vrstva

(Zdroj: PTÁČEK a kol. *Nauka o materiálu I.*)

h – výška reliéfu po broušení

B – výška Beilbyovy vrstvy

4.5 Leptání vzorků

Metalografické leptání se provádí před pozorováním optickým mikroskopem v případech, ve kterých je požadováno zvýraznit takové strukturní detaily, jako jsou hranice, velikost a orientace zrn, nebo rozložení jednotlivých fází ve struktuře.

³⁹ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I.* 2003. str. 380 až 381

Nejpoužívanějším způsobem je **chemické leptání**, které využívá rozdílné rozpouštěcí schopnosti jednotlivých fází, hranic zrn a různě orientovaných zrn. Působením chemického leptadla tak vzniká na vyleštěném povrchu vzorku reliéf, od kterého se odráží světelné paprsky do různých směrů, což se projevuje viditelnými detaily v optickém mikroskopu. Podle vlivu na strukturu se rozlišuje leptání *na hranice zrn*, *plošné* (zvýraznění orientace zrn) nebo *barevné* (barevné rozlišení fází).

Dalšími způsoby jsou **elektrolytické leptání** (podobný reliéf, jako při chemickém leptání, pouze rozpouštění materiálu probíhá elektrolýzou) a **tepelné leptání** (vytváření různě tlustých oxidických vrstev na jednotlivých zrnech, které se pak jeví různě zbarvené, nebo odpařování materiálu ve vakuu s následným vznikem reliéfu).⁴⁰

4.6 Možné vlivy mechanické preparace na hodnocení vzorků

Zřejmě největším nebezpečím pro ocel, zvláště pak nerovnovážně tepelně zpracovanou (kalenou), během mechanické přípravy vzorků je tepelné ovlivnění, tzv. *vyhřátí* vzorku. K nejvýraznějšímu zvýšení teploty vzorku dochází při abrazivním dělení vlivem tření a plastické deformace materiálu v místě řezu. Podobným způsobem může působit i mechanické broušení. Další tepelné ovlivnění vzorku může vzniknout při použití metody tlakového zalévání za tepla, kdy teploty vytvrzení zalévací hmoty dosahují hodnot až 200°C. Zvýšená teplota působí v oceli řadu změn, např. změnu rozpustností přísadových prvků v železe, difuzní pochody, rozpady nerovnovážných fází a při překročení teploty A_1 i úplnou změnu struktury. Pro cementované a povrchově kalené oceli jsou rozhodující změny struktury a gradientů tvrdosti způsobené *popuštěním*. Vliv tohoto popuštění na vzorek závisí na složení zkoumané oceli a také na úrovni provedeného tepelného zpracování (např. množství zbytkového austenitu, přecementování, teplota popuštění aj.), ale většinou se projeví poklesem tvrdosti v povrchové vrstvě. V extrémním případě vyhřátí nad teplotu austenitizace a následného rychlého ochlazení může dojít, zejména u vysokouhlíkových ocelí, k přikalení materiálu a vniku tzv. *bílé vrstvy*, která je křehká, má vysokou tvrdost a mohou se kolem ní iniciovat praskliny.⁴¹

⁴⁰ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2003. str. 382 až 384

⁴¹ PTÁČEK a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2002.

SIPOS, K., LÓPEZ, M. a TRUCCO, M. *Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel*. [Online] 2008.

Další možné vlivy mohou být např. plastická deformace vnesená do materiálu během řezání, broušení i leštění, specifické vlastnosti Beilbyovy vrstvy po leštění, poškrábaný povrch (stává se, pokud se vzorek nedostatečně opláchne při přechodu na jiné brusivo), koroze (když se vzorek neomyje důkladně lihem a nevysuší po leštění), nebo nedostatečné, či naopak přílišné naleptání. Řada těchto faktorů je ovlivněna do značné míry zkušeností a precizností člověka, jež tyto operace provádí.

5 Experimentální část práce – vliv chlazení a typu řezného kotouče na měření gradientu tvrdosti

Úkolem praktické části mé bakalářské práce je posoudit, jak se projeví změna parametrů abrazivního řezání na metalografických vzorcích odebraných jednak z povrchově kalené strojní součásti – čepu vahadel, a také z cementovaného dílu – víka axiálního ložiska klikového hřídele.

Hlavními sledovanými veličinami u všech vzorků jsou gradient tvrdosti zakalené vrstvy měřený metodou HV 0.5 a maximální hodnota této tvrdosti. Dále je posuzována i mikrostruktura vzorků, nicméně tato pozorování tvoří spíše okrajovou část práce vzhledem k tomu, že metalografický rozbor mikrostruktury není náplní bakalářského studijního programu.

Parametry, které jsem při dělení vzorků měnil, byly dány možnostmi metalografické laboratoře Katedry materiálu. Konkrétně jsem prováděl řezy se zapnutým či vypnutým přívodem chladicí vody do místa řezu, a to při použití 3 různých řezných kotoučů s odlišnou tvrdostí pojiva. Kromě toho jsem 2 vzorky od každé součásti žíhal při různých teplotách, abych tak simuloval konkrétní teplotu vyhřátí. Vliv další přípravy na vzorky jsem minimalizoval tím, že jsem ji prováděl za stejných podmínek a s použitím automatické brusky/leštičky.

5.1 Zkoušené součásti

- **Povrchově kalená součást:** čep vahadel (nákres příloha 1), mat. ČSN 12 060.6 z 12 060.1, indukčně povrchově kaleno do hloubky 0,4 až 0,8 mm na tvrdost 57 až 61 HRC (odpovídá zhruba 632 až 722 HV).
- **Cementovaná součást:** víko axiálního ložiska klikového hřídele (nákres příloha 2), mat. ČSN 14 220.4 z 14 220.1, cementováno do hloubky 0,3 až 0,5 mm, kaleno na tvrdost 56 až 62 HRC (odpovídá zhruba 612 až 748 HV). Součást slouží v laboratoři defektoskopie katedry

materiálu jako etalon prasklin vzniklých kombinací nevhodné struktury cementované vrstvy a následného razantního broušení.

5.2 Použitá zařízení a metody

- **Pila pro abrazivní řezání:** *Buehler Delta AbrasiMet*. Manuální ovládání přtlaku, otáčky kotouče 2830 min^{-1} , možné chlazení místa řezu vodou.
 - **STŘEDNÍ KOTOUČ:** *Buehler 102510P* $254 \times 1,5 \times 32$ (dále neoznačen)
Brusivo: Al_2O_3 ; pojivo: pryskyřice; doporučené použití: slitiny železa o tvrdosti 50 až 60 HRC (cca 513 až 698 HV).
 - **MĚKKÝ KOTOUČ:** *Buehler 102509N* $250 \times 1,5 \times 32$ - 40A 100-9 M 3 B9200
Brusivo: Al_2O_3 ; pojivo: pryskyřice; doporučené použití: ocel a tvrdé materiály s tvrdostí nad 60 HRC (cca nad 698 HV).
 - **TVRDÝ KOTOUČ:** *Buehler 102511N* $250 \times 1,5 \times 32$ - 40A 100-9 Q 3 B9220
Brusivo: Al_2O_3 ; pojivo: pryskyřice; doporučené použití: měkké a středně tvrdé oceli a neželezné materiály, polymery.
- **Lis pro tlakové zalévání za tepla:** *Buehler SimpliMet 1000*. Použitá zalévací hmota *Dentacryl technický*. Zalévání při teplotě 180°C a tlaku 290 bar.
- **Automatická bruska/leštička:** *Buehler Phoenix Beta grinder/polisher*. Postup podle pokynů firmy Buehler pro přípravu kalené oceli.
 - *Rovinné broušení:* brusný papír P320, chlazení vodou, přtlak 15 N, otáčky hlavy a kotouče sousledné, otáčky kotouče 250 min^{-1} .
 - *Broušení:* kotouč Buehler Hercules H, diamantová suspenze $9 \mu\text{m}$, přtlak 15 N, ot. hlavy a kotouče sousledné, ot. kotouče 150 min^{-1} , doba 5 min.
 - *Jemné broušení:* kotouč Buehler Trident, diamantová suspenze $3 \mu\text{m}$, přtlak 15N, ot. hlavy a kotouče sousledné, ot. kotouče 150 min^{-1} , doba 3 min.
 - *Leštění:* kotouč Buehler ChemoMet, suspenze oxidu křemičitého Buehler MasterMet 2, přtlak 15 N, ot. hlavy a kotouče nesousledné, ot. kotouče 50 min^{-1} , doba 2 min.

- **Leptadlo:** *Nital 3%*.
- **Tvrdoměr:** *Buehler MikroMet 2100*. Měření gradientu tvrdosti metodou Vickers zatížením 0,5 kp (4,9 N) po dobu 10 s.
- **Optický metalografický mikroskop:** *Zeiss Neophot 32*. Zvětšení 25 až 1000×

5.3 Vlastní měření

Z každé součásti jsem odebral 8 vzorků. Řezy na vahadlovém čepu jsem prováděl kolmo na osu čepu v kalených částech povrchu při výšce jednoho vzorku cca 10 mm. Vzorky z víka jsem odebíral z vnějších okrajů děr pro šrouby.

Vzorky označené číslem 0 jsou brány jako referenční a byly odříznuty středním kotoučem, jehož doporučené použití odpovídá této konkrétní aplikaci, se zapnutým chlazením.

Vzorky označené čísly 1 a 2 jsem oddělil stejným způsobem, jako č. 0, a následně jsem je vložil do pece vyhřáté na 300°C, resp. 600°C, a zde je ponechal po dobu 2 minut. Poté jsem je nechal volně ochladit na klidném vzduchu.

Parametry dělení všech vzorků jsou uvedeny v tabulce 1.

Poznámka: Vzhledem k tomu, že přítlak kotouče použité pily je ovládán manuálně, jsem se snažil vyvíjet vždy přibližně stejný přítlak cca 1 kg.

Tabulka 1 Dělení vzorků

Č. VZORKU	KOTOUČ	CHLAZENÍ	ŽIHÁNÍ
0	ŠTŘEDNÍ	ANO	NE
1	STŘEDNÍ	ANO	300°C, 2 min
2	STŘEDNÍ	ANO	600°C, 2 min
3	STŘEDNÍ	NE	NE
4	MĚKKÝ	ANO	NE
5	MĚKKÝ	NE	NE
6	TVRDÝ	ANO	NE
7	TVRDÝ	NE	NE

Další kroky metalografické přípravy vzorků jsem prováděl za podmínek uvedených v předcházející podkapitole 5.2.

Měření gradientu tvrdosti bylo provedeno metodou *HV 0.5*.

U některých vzorků z čepu se provedlo měření ve dvou směrech, dále označených doplňkovou číslicí za číslem vzorku. Směr 1 značí měření v místě, kde byla horní část vzorku během řezání, tedy místo, kde došlo k prvnímu kontaktu kotouče a čepu. Směr 2 naopak označuje měření v dolní části, kde řez končil (v tomto místě lze předpokládat nejvyšší tepelné ovlivnění vzorku).

Měření tvrdosti víka se provádělo pouze v jednom směru, a to od horní (nefunkční) strany víka, kde byl při dělení počátek řezu. Dolní (funkční) strana víka byla, na rozdíl od horní, ještě po tepelném zpracování obráběna, a proto by naměřené hodnoty nebyly relevantní.

5.3.1 Měření povrchově kaleného čepu

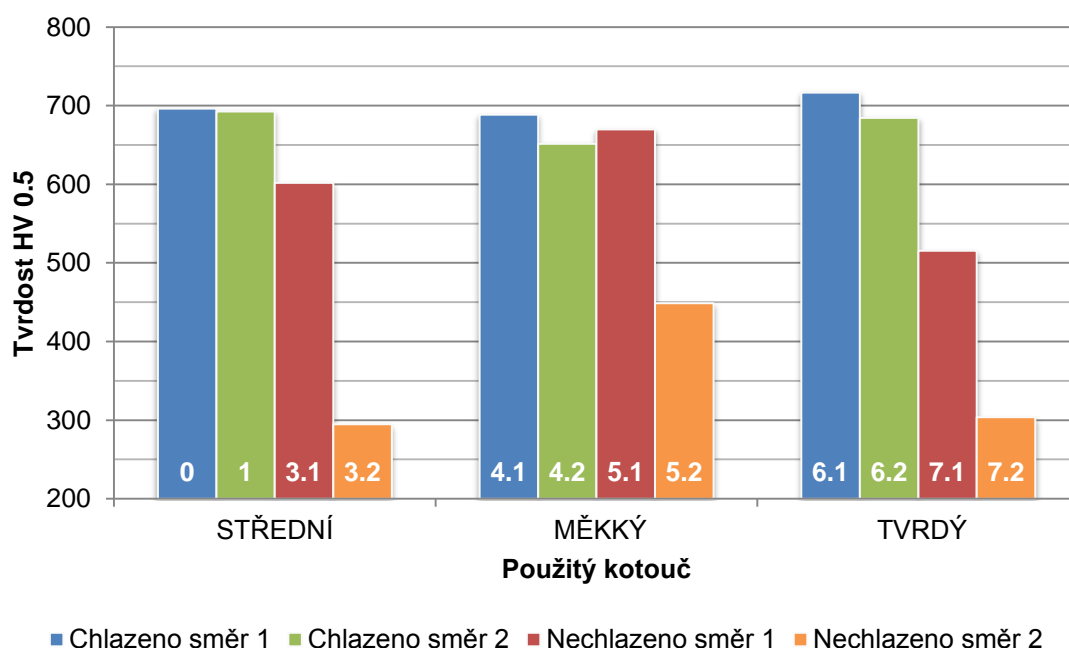
Protokoly z měření gradientu tvrdosti a vybrané fotografie struktur v povrchové vrstvě jsou v přílohách 3 až 12. V tabulce 2 jsou zapsány maximální hodnoty tvrdosti z měření gradientů.

Tabulka 2 Maximální hodnoty tvrdosti v povrchové vrstvě čepu

Č. VZORKU	TVRDOST HV 0.5	PŘÍPRAVA
0	696,6	STŘEDNÍ, CHLAZENO
1	692,9	STŘEDNÍ, CHLAZENO, 300°C
2	399,8	STŘEDNÍ, CHLAZENO, 600°C
3.1	601,8	STŘEDNÍ, NECHLAZENO
3.2	294,8	
4.1	688,8	MĚKKÝ, CHLAZENO
4.2	651,8	
5.1	670,1	MĚKKÝ, NECHLAZENO
5.2	448,9	
6.1	716,8	TVRDÝ, CHLAZENO
6.2	684,7	
7.1	515,8	TVRDÝ, NECHLAZENO
7.2	303,8	

Následuje grafické porovnání těchto naměřených hodnot v grafu 1.

Graf 1 Maximální hodnoty tvrdosti v povrchové vrstvě čepu
(pozn.: pro střední kotouč je u „chlazeno směr 2“ vynesena hodnota po 300°C žihání)



Hodnocení mikrostruktury v povrchové vrstvě čepu:

Strukturu povrchově kalené vrstvy vzorku **0** (příloha 3) tvoří homogenní jemný martenzit se známkami nízkoteplotního popuštění.

Vzorek **1** (příloha 4), žíhaný na 300°C, má strukturu téměř shodnou se vzorkem 0.

Vzorek **2** (příloha 5) již nese viditelné znaky popuštění (sferoidizace martenzitu).

Vzorek **3.1** (příloha 6) má známky vyhřátí (mírného popuštění) a velmi tenkou povrchovou vrstvičku s výraznějším popuštěním. U vzorku **3.2** (příloha 7) došlo již k intenzivnímu vyhřátí při výběhu kotouče z řezu, které způsobilo změnu struktury na feriticko-perlitickou (obdobu normalizačního žihání).

Vzorky **4.1** a **4.2** (oba příloha 8), **6.1** a **6.2** (oba příloha 10) mají strukturu i tvrdost s minimálním ovlivněním.

Vzorky **5.1** a **5.2** (oba příloha 9) strukturně přibližně odpovídají vzorkům 3.1 a 3.2.

Mírné zvětšení sferoidizace martenzitu u vzorku **7.1** (příloha 11) vykazuje vyhřátí materiálu. U vzorku **7.2** (příloha 12) došlo opět k výrazné změně struktury, kterou tvoří lamelární či přechodový perlit s obálkami nebo jehličkami feritu.

5.3.2 Měření cementovaného víka

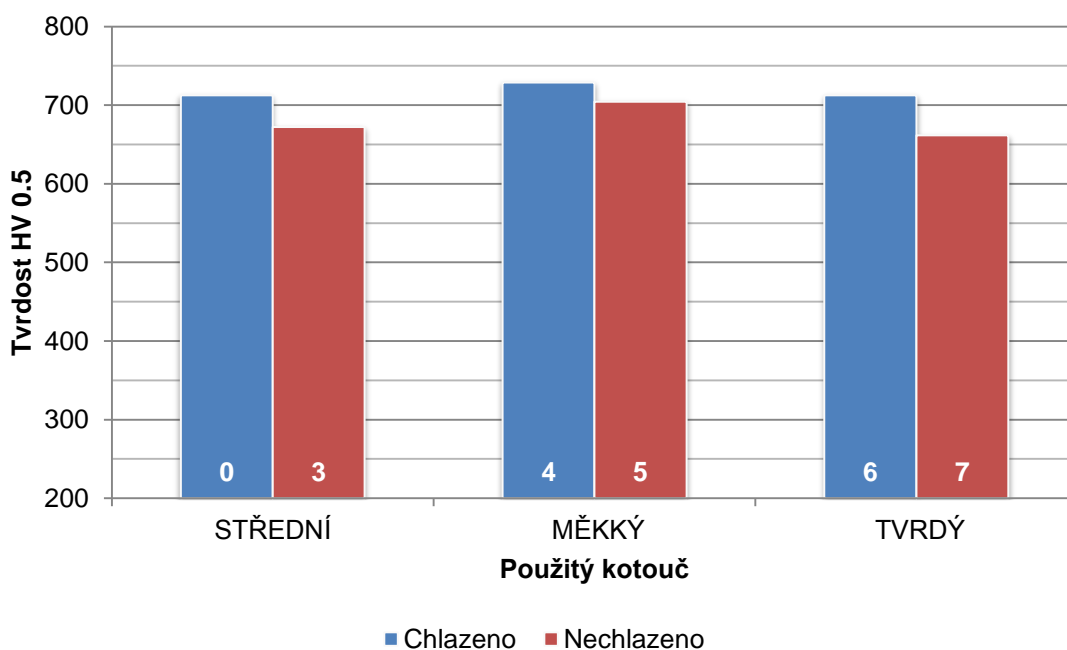
Protokoly z měření gradientu tvrdosti a fotografie struktur v povrchové vrstvě jsou v přílohách 13 až 20. V tabulce 3 jsou zapsány maximální hodnoty tvrdostí z měření gradientů.

Tabulka 3 Maximální hodnoty tvrdosti v povrchové vrstvě víka

Č. VZORKU	TVRDOST HV 0.5	PŘÍPRAVA
0	712,8	STŘEDNÍ, CHLAZENO
1	704,5	STŘEDNÍ, CHLAZENO, 300°C
2	556,0	STŘEDNÍ, CHLAZENO, 600°C
3	672,6	STŘEDNÍ, NECHLAZENO
4	729,0	MĚKKÝ, CHLAZENO
5	704,7	MĚKKÝ, NECHLAZENO
6	712,8	TVRDÝ, CHLAZENO
7	661,9	TVRDÝ, NECHLAZENO

Grafické srovnání maximálních naměřených hodnot tvrdosti následuje v grafu 2.

Graf 2 Maximální hodnoty tvrdosti v povrchové vrstvě víka



Hodnocení mikrostruktury v povrchové vrstvě víka:

Na povrchu vzorku **0** (příloha 13) je tenká vrstvička popuštěného martenzitu s výskytem útvarů cementitu (zřejmě důsledek přesycení uhlíkem během cementace). Za ní následuje oblast vysokým obsahem zbytkového austenitu (až 50%).

Povrch vzorku **1** (příloha 14) tvoří vrstva martenzitu, za níž následuje oblast výrazně jehlicovitého martenzitu s vysokým obsahem zbytkového austenitu (od 30 do 50%).

U vzorku **2** (příloha 15) postupně směrem od povrchu roste obsah zbytkového austenitu v martenzitu až zhruba k 50% a hlouběji opět klesá.

U povrchu vzorku **3** (příloha 16) se vyskytuje sekundárně přikalená vrstva martenzitu bez zbytkového austenitu, místy se shluky cementitu (známka přesycení uhlíkem). Na tuto vrstvu navazuje oblast martenzitu s vysokým obsahem zbytkového austenitu (místy až 60%).

Vzorek **4** (příloha 17) má těsně pod povrchem tenkou vyhřátou vrstvu, na kterou navazuje proměnlivě tlustá vrstva martenzitu s různým obsahem zbytkového austenitu (do 60%).

Vzorek **5** (příloha 18) má u povrchu sekundárně přikalenou vrstvu, pod níž se nachází martenzit a zbytkový austenit (asi 30 až 50%).

Na povrchu vzorku **6** (příloha 19) se nachází sekundárně přikalená vrstva s navazující popuštěnou vrstvičkou, pod níž je oblast martenzitu nejprve s nižším, a poté s vyšším obsahem zbytkového austenitu.

Sled struktur vzorku **7** (příloha 20) je v zásadě stejný, jakou v případě vzorku 6.

6 Diskuse výsledků

6.1 Povrchově kalený čep vahadel

Všechny hodnoty gradientu tvrdosti naměřené **u vzorků odříznutých s chlazením** bez dalšího tepelného zpracování, tedy vzorky **0** (příloha 3), **4** (příloha 8) a **6** (příloha 10), odpovídají předepsanému tepelnému zpracování (632 až 722 HV do hloubky 0,4 až 0,8 mm). Maximální naměřené tvrdosti povrchu se pohybují mezi 651,8 a 716,8 HV do hloubky těsně kolem 0,6 mm. Tvrdost jádra v hloubce kolem 1 mm se pohybuje mezi 231 a 245 HV, což je oblast použití tvrdého kotouče, zatímco měkký a střední kotouč jsou doporučeny pro tvrdosti vyskytující se pouze v tenké povrchové vrstvě. Tímto se vysvětluje, proč jsou nejvyšší hodnoty naměřeny u vzorků řezaných tvrdým kotoučem – největší objem materiálu měl tvrdost vhodnou pro tento typ kotouče, a došlo tak k nejmenšímu vývinu tepla v jádře, zatímco povrch byl dobře chlazen. Rozdíl mezi tvrdostí naměřenou u vzorků **4** a **6** ve směru 1 (počátek řezu) a nižší tvrdostí ve směru 2 (konec řezu) činil přibližně 5%. Je způsoben mírným vyhrátím (popuštěním martenzitu), které vzniklo v důsledku obtížnějšího přístupu chladicí kapaliny do místa řezu a také zhoršeným odvodem tepla materiálem, který má ke konci řezu již zvýšenou teplotu. Struktury povrchové vrstvy pozorované při 500× zvětšení nevykazují žádné výraznější viditelné změny oproti předepsanému stavu, tedy nízkoteplotně popuštěnému martenzitu.

Vzorky dělené bez použití chlazení byly již při provádění řezu viditelně tepelně ovlivňovány a k dokončení řezu bylo zapotřebí delší doby a někdy i zvýšení přtlaku. Jediný vzorek, jehož tvrdost ještě zůstala v předepsaných mezích, byl vzorek **5** (příloha 9) při měření ve směru 1 (670,1 HV do hloubky cca 0,5 mm). Absence chlazení sice způsobila mírné popuštění martenzitu v celé vrstvě, a větší popuštění asi 50 µm tenké vrstvy na povrchu, ale kombinace měkkého kotouče a relativně dobrého odvodu tepla na počátku řezu dokázala zabránit výraznějšímu ovlivnění. Měkký kotouč se osvědčuje díky tomu, že dochází k rychlejšímu odstraňování opotřebovaného brusiva z povrchu kotouče a odhalování nových zrn brusiva (*sa-moostření kotouče*).

S rostoucí tvrdostí kotouče roste i tepelné ovlivnění materiálu vzorku ve směru 1. U vzorku **3** (příloha 6) klesla maximální tvrdost na 601,8 HV a u vzorku **7** (příloha 11) na 515,8 HV, přestože strukturní změny nejsou příliš výrazné.

Ve směru 2 u výběhu kotouče z řezu došlo již k velmi zřejmému ovlivnění vzhledem ke špatnému odvodu tepla z místa řezu. Nejlépe si opět vedl měkký kotouč, hodnota tvrdosti 448,9 HV u vzorku **5** (příloha 9) je však výrazně nižší, než je předepsáno. Tvrdosti naměřené na vzorcích **3** (příloha 7) a **7** (příloha 12) jsou srovnatelné (294,8 resp. 303,8 HV) a víceméně se shodují s tvrdostí jádra. U těchto vzorků došlo k takovému vyhřátí, že se jejich původně martenzitická struktura rozpadla na feriticko-perlitickou.

V praxi se provádí přejímka povrchově kalených dílů podle efektivní hloubky prokalení použitím kritéria $HL = 0,8 HV_{min}$ (viz kap. 3.2.1). V tomto případě je předepsáno $HRC_{min} = 57$ a podle tabulky A4 v normě ČSN ISO 15787 této hodnotě odpovídá $HL = 500 HV$.

Odhad efektivní hloubky prokalení CHD z grafů gradientů tvrdosti pro jednotlivé vzorky je v následující tabulce 4.

Tabulka 4 Efektivní hloubka prokalení čepu

Č. VZORKU	CHD [mm]
0	0,69
1	0,71
2	x
3.1	0,66
3.2	x
4.1	0,64
4.2	0,62
5.1	0,55
5.2	x
6.1	0,73
6.2	0,66
7.1	0,61
7.2	x

Z tabulky 4 je patrné, že nejvíce tepelně ovlivněné vzorky (**2**, **3.2**, **5.2** a **7.2**) ani nedosahují požadované tvrdosti. Všechny ostatní vzorky pak splňují předepsanou hloubku prokalení, a byly by tak při přejímce označeny jako shodné s předpisem. Na druhou stranu jsou však zřejmé rozdíly v naměřených hloubkách, např. mezi tvrdým kotoučem s chlazením ve směru 1 (**6.1**) a měkkým

kotoučem s chlazením ve směru 2 (**4.2**) je rozdíl 0,11 mm, který by v hraničním případě mohl znamenat i nepřijetí správného dílu.

6.2 Cementované víko axiálního ložiska

Při použití chlazení se mezi sebou naměřené maximální hodnoty tvrdosti příliš neliší. Nejvyšší tvrdost má vzorek **4** (příloha 17) odebraný měkkým kotoučem, a to 729 HV. Vzorek **0** (příloha 13) i **6** (příloha 19) mají oba maximum na 712,8 HV. Zdánlivě tak všechny splňují předepsanou tvrdost 612 až 748 HV do hloubky 0,3 až 0,5 mm.

Zatímco však profil tvrdosti vzorku **4** je bez výraznějších výkyvů a tvrdost se pohybuje nad hodnotou 655 HV až do vzdálenosti cca 0,8 mm, v dalších případech je tomu jinak. Konkrétně u vzorku **0** odříznutého středním kotoučem se na povrchu vyskytuje tepelně ovlivněná vrstva a dolní předepsané tvrdosti je dosaženo až ve vzdálenosti cca 0,18 mm. Předepsaná tvrdost je až do hloubky asi 1 mm. U vzorku **6** je podle tvrdosti i struktury evidentní sekundárně přikalená bílá vrstva s tvrdostí 709,7 HV, která postupně přechází v měkký popuštěný martenzit a ten opět ve tvrdší martenzit s malým obsahem zbytkového austenitu. Předepsaná tvrdost je v hloubce od povrchu do cca 0,1 mm a následně zhruba od 0,25 do 0,9 mm.

Nejmenší ovlivnění tedy způsobil měkký kotouč a s rostoucí tvrdostí pojiva rostlo i ovlivnění tvrdosti a struktury vzorků, což je v souladu s doporučenými oblastmi použití jednotlivých kotoučů.

Při řezu bez chlazení se již výrazněji projeví odlišné tvrdosti kotoučů, avšak maximální hodnoty tvrdosti vzorků, i přes pokles oproti řezání za mokra, zůstaly nad stanovenou dolní hranicí. Nejvyšší naměřená hodnota 704,7 HV je opět u vzorku odebraného měkkým kotoučem, tedy č. **5** (příloha 18). Následuje vzorek **3** (příloha 16) s hodnotou 672,6 HV a nakonec vzorek **7** (příloha 20) s hodnotou 661,9 HV.

Gradient tvrdosti vzorku **5** sice ukazuje mírně přikalenou vrstvu na povrchu a celkový pokles tvrdosti oproti řezu s chlazením, ale hodnota tvrdosti je nad dolní předepsanou hranicí až do hloubky cca 0,9 mm a splňuje tak předpis pro tuto součást. Vzorek **3** má maximální tvrdost na povrchu v přikalené vrstvičce, načež prudce klesá k 559,5 HV a poté pozvolna roste, přičemž nad požadovaných 612 HV se dostává až v hloubce 0,4 mm. U vzorku **7** je průběh tvrdosti podobný se vzorkem 6, tedy tvrdší přikalená vrstva na povrchu s dostatečnou tvrdostí do hloubky

asi 0,1 mm, následující popuštěná vrstva s nízkou tvrdostí a opět přecházející ve tvrdší martenzit, jehož tvrdost dosahuje těsně nad stanovenou dolní mez v hloubce od 0,37 do 0,83 mm.

Opět se ukázalo, že pro tento díl je vzhledem k jeho zvýšené tvrdosti kromě povrchu i v jádře vhodný kotouč s měkkou vazbou a s rostoucí tvrdostí řezného kotouče se zhoršují výsledky měření tvrdosti.

Při správné přípravě, nejlépe při použití měkkého rozbrušovacího kotouče a zapnutém chlazení, vzorek sice splňuje předepsané mechanické parametry (tvrdost a hloubku prokalení), nicméně pozorování struktury nasvědčuje tomu, že chemickotepelné zpracování této součásti bylo provedeno nevhodným způsobem. Výskyt cementitu v zakalené vrstvě ukazuje na přesycení uhlíkem během cementace. S rostoucím obsahem uhlíku klesají teploty M_s a M_f , což je činí obtížněji dosažitelné při chlazení z kalicí teploty, a proto dochází ke stabilizaci zbytkového austenitu. Zbytkový austenit tvoří místy až 60% struktury této součásti, což je zhruba desetinásobek obvyklého množství. Následkem toho je jednak dosaženo nižší tvrdosti, ale hlavně díky nestabilitě zbytkového austenitu může dojít k jeho rozpadu na feriticko-karbidickou směs, která má větší objem, a tak vzniká v materiálu vnitřní pnutí, jež může vést až ke vzniku trhlin.

7 Závěr

V rámci bakalářské práce jsem se v souladu se zadáním seznámil se základními technologickými a užitnými vlastnostmi ocelí s cementovanou či povrchově kalenou vrstvou. Dále jsem se obeznámil s doporučenými postupy při přípravě a hodnocení metalografických vzorků, které jsem poté použil během experimentální části práce. Účelem experimentu bylo určit vliv chlazení a tvrdosti pojiva rozbrušovacího kotouče na gradient tvrdosti a strukturu cementované a povrchově kalené strojní součásti.

Získané poznatky:

- Měření gradientu tvrdosti je vhodné provádět, pokud možno, v místě počátku řezu, kde je nejlepší odvod tepla, a tedy nejmenší tepelné ovlivnění vzorku.
- Chlazení místa řezu hraje zásadní roli při zachování vlastností vzorku, především v pokročilejší fázi řezu, kdy je zhoršený odvod tepla materiálem.
- Vliv tvrdosti kotouče na viditelné detaily struktury vzorku je při správném chlazení zanedbatelný.
- Tvrdost kotouče se projevuje především při zhoršených podmínkách chlazení. Při zhoršeném odvodu tepla způsobuje tvrdší kotouč větší vyhřátí.
- Pro povrchově kalený čep z mat. ČSN 12 060.6 se nejvíce hodí řez tvrdým kotoučem se spuštěným chlazením. Při použití měkkého kotouče bez chlazení došlo v horní části řezu pouze k nepatrnému popuštění struktury a poklesu tvrdosti. Ostatní řezy bez chlazení skončily degradací materiálu.
- Pro cementované víko ložiska z mat. ČSN 14 220.4 se nejvíce hodí řez měkkým kotoučem se spuštěným chlazením. Na povrchu snadno dochází k přikalení. Tvrdší kotouč způsobuje větší tepelné ovlivnění materiálu. Chemickotepelné zpracování dílu bylo nevhodně provedeno.
- Nevhodný způsob dělení při přípravě metalografického vzorku může vést k zamítnutí přijetí správného dílu při přejímce.

8 Použitá literatura

Tištěné zdroje:

1. **HLUCHÝ, M. a KOLOUCH, J.** *Strojírenská technologie 1, 1. díl. Nauka o materiálu.* Praha : Scientia, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
2. **PTÁČEK, Luděk a kol.** *Nauka o materiálu I.* Brno : CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
3. —. *Nauka o materiálu II.* Brno : CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
4. ČSN EN ISO 2639. *Ocel - Stanovení a ověření hloubky cementace.* Praha : Český normalizační institut, 2003.
5. ČSN ISO 15787. *Technická dokumentace - Tepelné zpracování součástí z železných kovů - Označování na výkresech.* Praha : Český normalizační institut, 2003.

Elektronické zdroje:

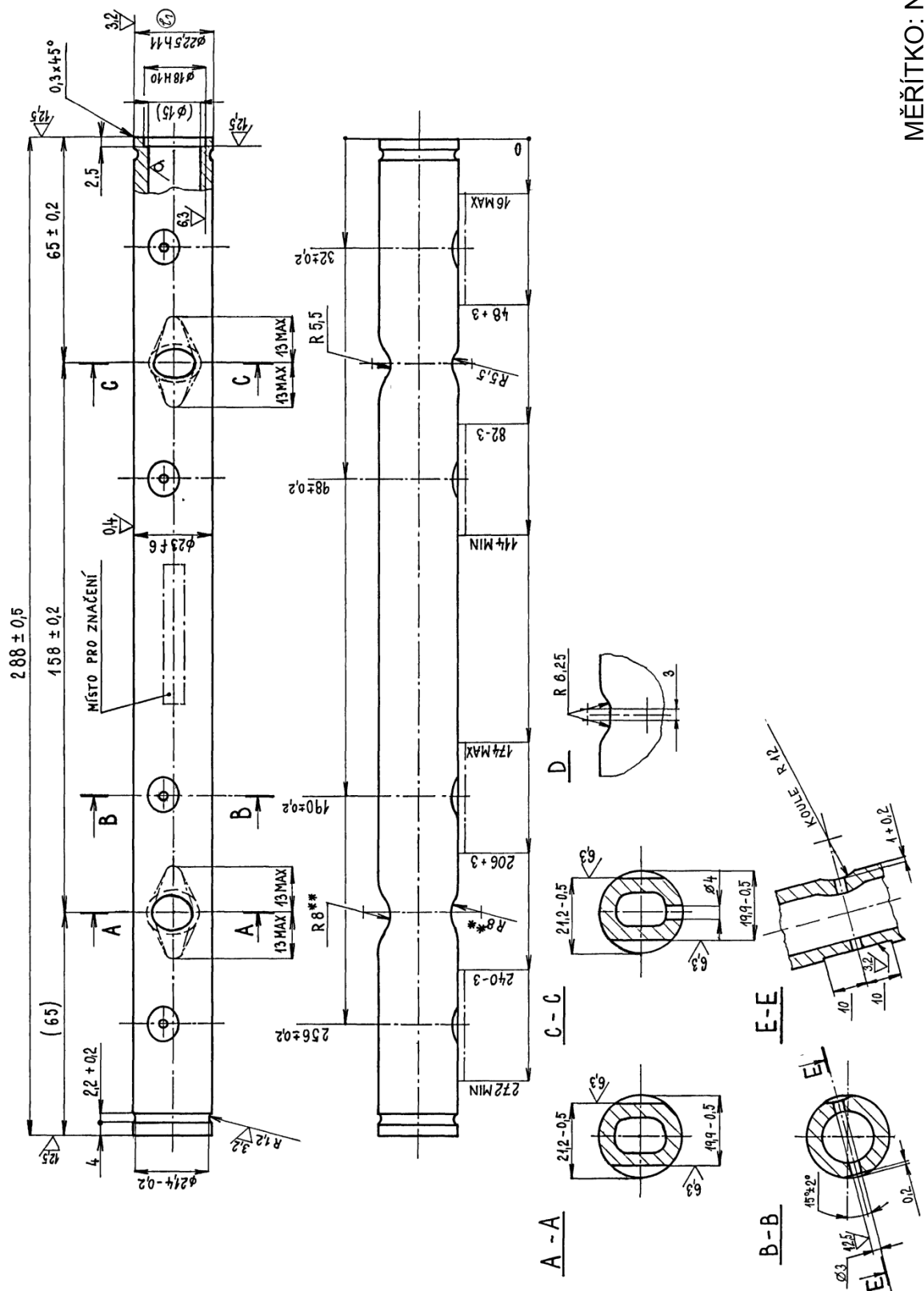
6. **LINDEGREN, Maria.** *Hardness Testing and Specimen Preparation.* [Online] 2010. [Citace: 26. 2. 2012.] URL: <http://www.struers.cz/resources/elements/12/144460/Application_Note_Hardness_Testing_English.pdf>.
7. **SIPOS, K., LÓPEZ, M. a TRUCCO, M.** *Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel.* [Online] 2008. [Citace: 10. 5. 2012.] URL: <<http://www.scielo.org.ve/pdf/uct/v28n1/art06.pdf>>.
8. **Struers A/S.** *Application guide for hot mounting.* [Online] 2010. [Citace: 17. 4. 2012.] URL: <http://www.struers.cz/resources/elements/12/134513/Hot_Mounting_Guide_10.10.pdf>.
9. —. *Case Hardness Depth (CHD) - Měření povrchové tvrdosti.* [Online] 2012. [Citace: 31. 3. 2012.] URL: <http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=156&sub_id=222&doc_id=918&admin_language=19>.

10. —. *Cold mounting*. [Online] 2010. [Citace: 12. 4. 2012.] URL:
<http://www.struers.cz/resources/elements/12/122215/Cold_Mounting_brochure_English.pdf>.
11. —. *Cut-off wheels*. [Online] 2010. [Citace: 10. 4. 2012.] URL:
<http://www.struers.com/resources/elements/12/169168/Cut_offWheelsBrochureEnglish.pdf>.
12. —. *Filozofie preparace*. [Online] 2012. [Citace: 3. 4. 2012.] URL:
<http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=19&sub_id=22&doc_id=86>.
13. —. *O broušení a leštění*. [Online] 2012. [Citace: 17. 4. 2012.] URL:
<http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=23&doc_id=104&target=_self&admin_language=19>.
14. —. *O řezání*. [Online] 2012. [Citace: 3. 4. 2012.] URL:
<http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=21&doc_id=93&target=_self&admin_language=19>.
15. —. *O zalévání*. [Online] 2012. [Citace: 12. 4. 2012.] URL:
<http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=51&doc_id=368&target=_self&admin_language=19>.
16. —. *O zalévání za horka*. [Online] 2012. [Citace: 17. 4. 2012.]
URL: <http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=51&sub_id=77&doc_id=95>.
17. —. *O zalévání za studena*. [Online] 2012. [Citace: 12. 4. 2012.]
URL: <http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=51&sub_id=78&doc_id=281>.
18. **ZIPPERIAN, Donald C.** *Metallographic handbook*. [Online] 2011. [Citace: 14. 3. 2012.]
URL: <<http://www.metallographic.com/Brochures/Met-Manual-2b.pdf>>.
19. *Inverted metallurgical microscopes*. [Online] [Citace: 23. 3 2012.]
URL: <<http://www.invertedmetallurgicalmicroscopes.com>>.

9 Přílohy

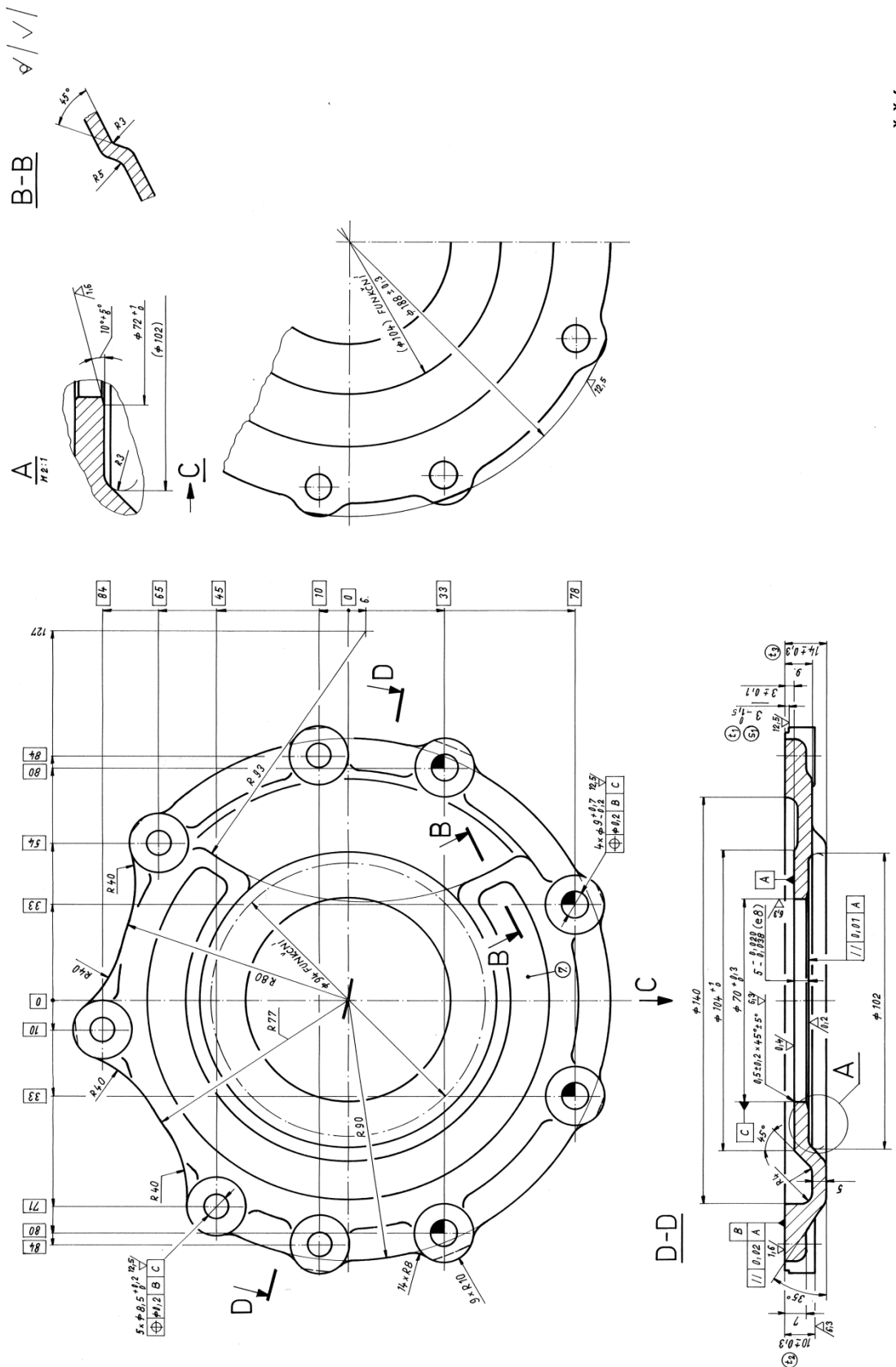
<i>Čep vahadel – nákres</i>	<i>příloha 1</i>
<i>Víko axiálního ložiska – nákres</i>	<i>příloha 2</i>
<i>Hřídel 0 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 3</i>
<i>Hřídel 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 4</i>
<i>Hřídel 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 5</i>
<i>Hřídel 3 směr 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 6</i>
<i>Hřídel 3 směr 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 7</i>
<i>Hřídel 4 směr 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 8</i>
<i>Hřídel 4 směr 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 8</i>
<i>Hřídel 5 směr 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 9</i>
<i>Hřídel 5 směr 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 9</i>
<i>Hřídel 6 směr 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 10</i>
<i>Hřídel 6 směr 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 10</i>
<i>Hřídel 7 směr 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 11</i>
<i>Hřídel 7 směr 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 12</i>
<i>Příruba 0 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 13</i>
<i>Příruba 1 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 14</i>
<i>Příruba 2 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 15</i>
<i>Příruba 3 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 16</i>
<i>Příruba 4 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 17</i>
<i>Příruba 5 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 18</i>
<i>Příruba 6 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 19</i>
<i>Příruba 7 - gradient tvrdosti</i>	<i>příloha 20</i>

9.1 Čep vahadel - náčres



MĚŘÍTKO: N

9.2 Víko axiálního ložiska - nákres



9.3 Měření gradientu tvrdosti – čep (hřídel)

Hřídel 0 - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	44.1	560.4	40.2	41.2	40.7
2	97.6	669.9	36.7	37.7	37.2
3	166.6	696.5	36.3	36.7	36.5
4	277.0	696.6	36.3	36.7	36.5
5	387.8	688.9	36.7	36.7	36.7
6	530.6	693.1	36.7	36.5	36.6
7	619.1	640.6	37.7	38.4	38.0
8	704.5	463.6	44.2	45.3	44.7
9	786.9	261.0	60.0	59.2	59.6
10	884.7	244.8	61.8	61.2	61.5
11	1021.4	251.7	60.8	60.6	60.7

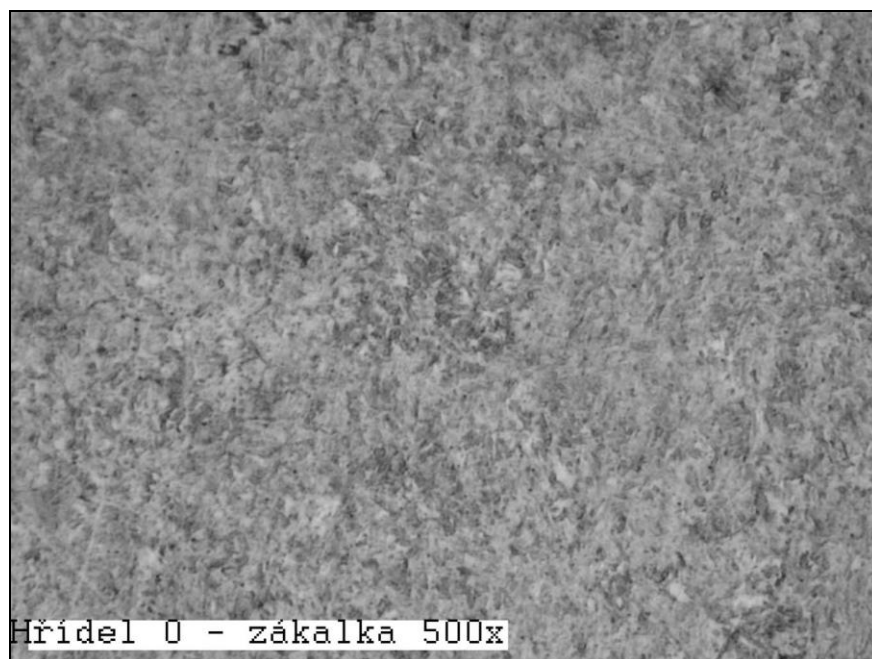
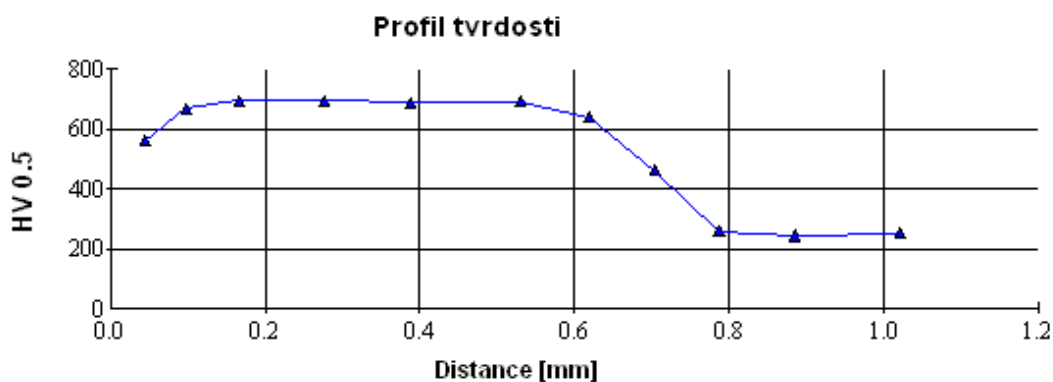
Dist – vzdálenost vpichu od povrchu

d1 – velikost 1. úhlopříčky vtisku

d2 – velikost 2. úhlopříčky vtisku

d – průměrná velikost úhlopříčky vtisku

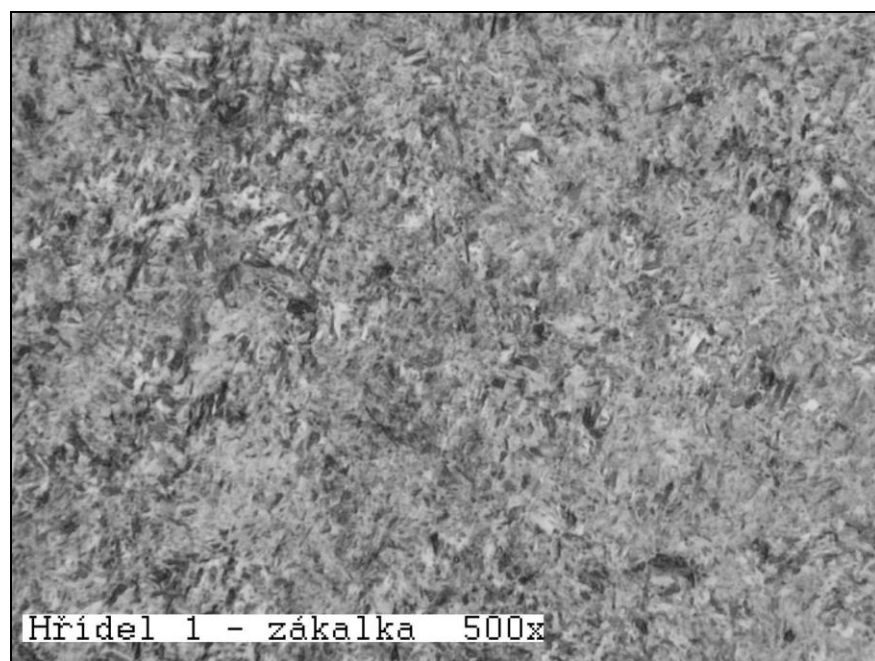
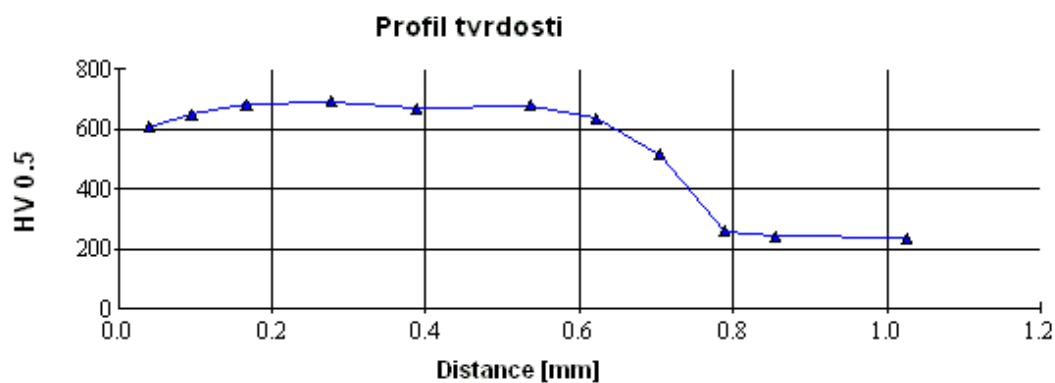
Minimum: 244.8 **Maximum:** 696.6
Průměr: 533.4 **Medián:** 640.6
StDev: 193.789



Hřídel 1 (po žíhání - 300 °C) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	40.0	607.7	39.1	39.0	39.1
2	95.4	651.1	37.3	38.2	37.7
3	166.8	684.0	36.9	36.7	36.8
4	277.1	692.9	36.3	36.9	36.6
5	388.4	669.4	37.1	37.3	37.2
6	536.4	680.9	36.9	36.9	36.9
7	621.2	638.4	38.1	38.1	38.1
8	704.0	514.5	42.0	42.9	42.5
9	788.2	258.5	60.0	59.8	59.9
10	855.4	241.5	61.9	62.0	62.0
11	1025.8	237.7	62.2	62.7	62.5

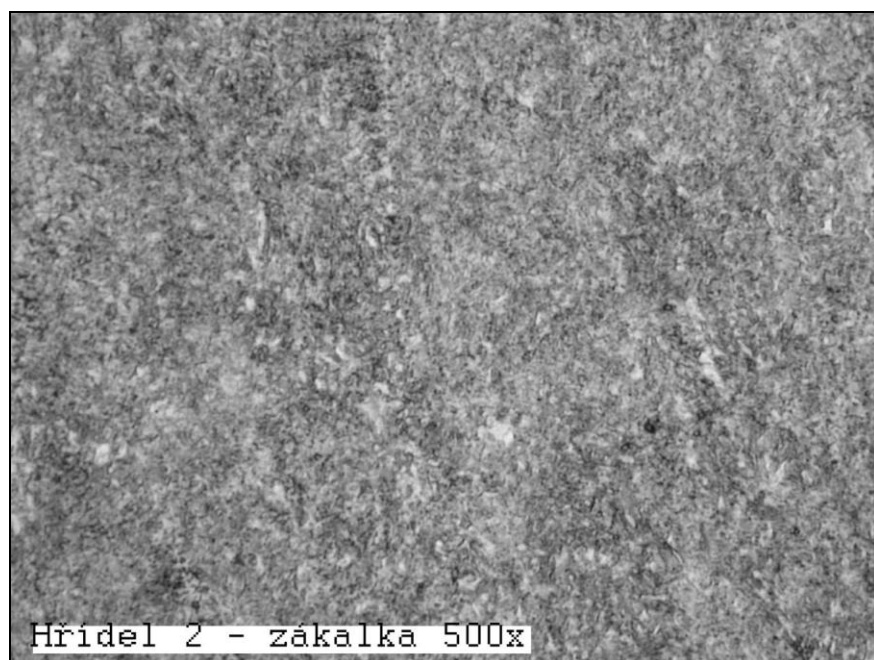
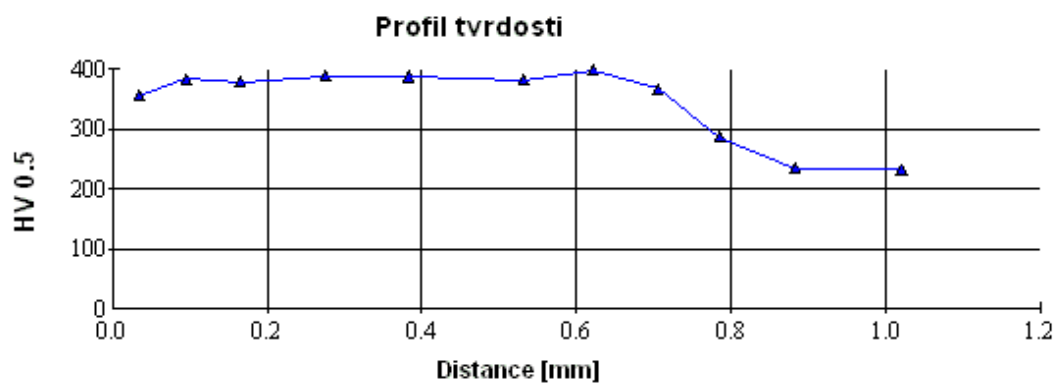
Minimum: 237.7 **Maximum:** 692.9
Průměr: 534.2 **Medián:** 638.4
StDev: 191.647



Hřídel 2 (popuštěn na 600 °C) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	34.8	355.9	50.9	51.1	51.0
2	94.9	383.7	49.0	49.3	49.2
3	164.9	379.2	49.9	49.0	49.5
4	275.3	389.9	48.9	48.7	48.8
5	383.5	388.4	49.3	48.4	48.9
6	531.7	382.0	49.1	49.5	49.3
7	621.6	399.8	48.5	47.8	48.2
8	705.3	368.1	49.9	50.5	50.2
9	784.6	287.5	56.7	56.9	56.8
10	883.2	234.5	63.0	62.7	62.9
11	1020.4	233.1	63.3	62.9	63.1

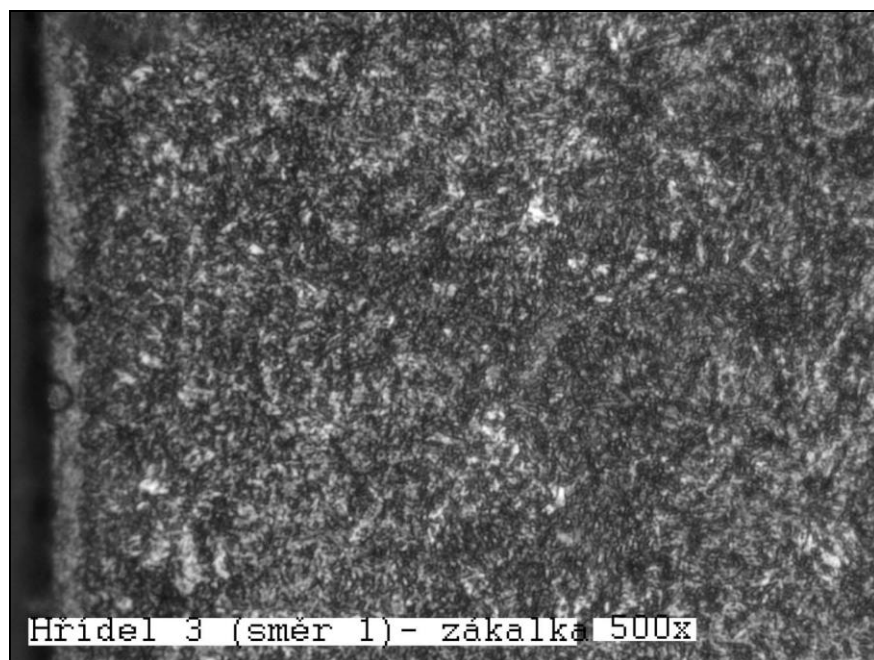
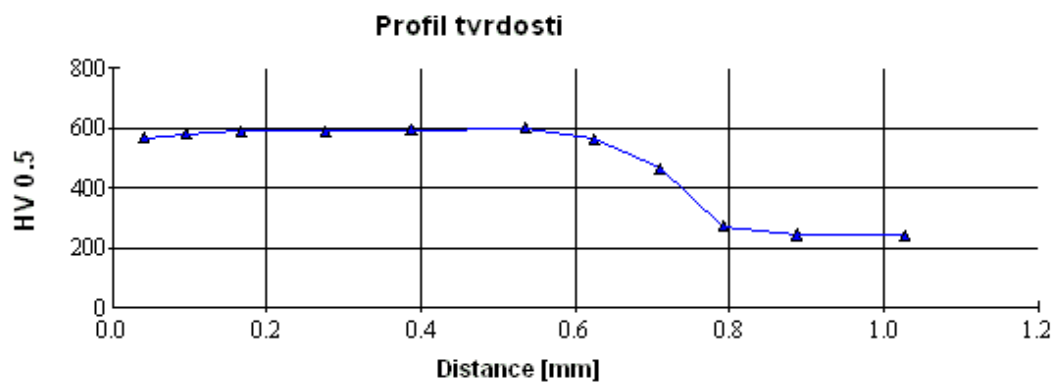
Minimum: 233.1 **Maximum:** 399.8
Průměr: 345.6 **Medián:** 379.2
StDev: 62.940



Hřidel 3 (směr1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	40.9	569.1	40.0	40.8	40.4
2	96.0	580.4	39.8	40.1	40.0
3	167.0	592.0	39.7	39.4	39.6
4	275.8	592.2	39.8	39.3	39.6
5	387.0	595.6	39.4	39.6	39.5
6	535.4	601.8	39.3	39.2	39.3
7	623.8	565.1	40.6	40.4	40.5
8	709.2	466.2	45.3	43.9	44.6
9	791.4	271.5	59.2	57.7	58.4
10	886.6	244.9	61.3	61.8	61.5
11	1027.2	244.1	61.6	61.6	61.6

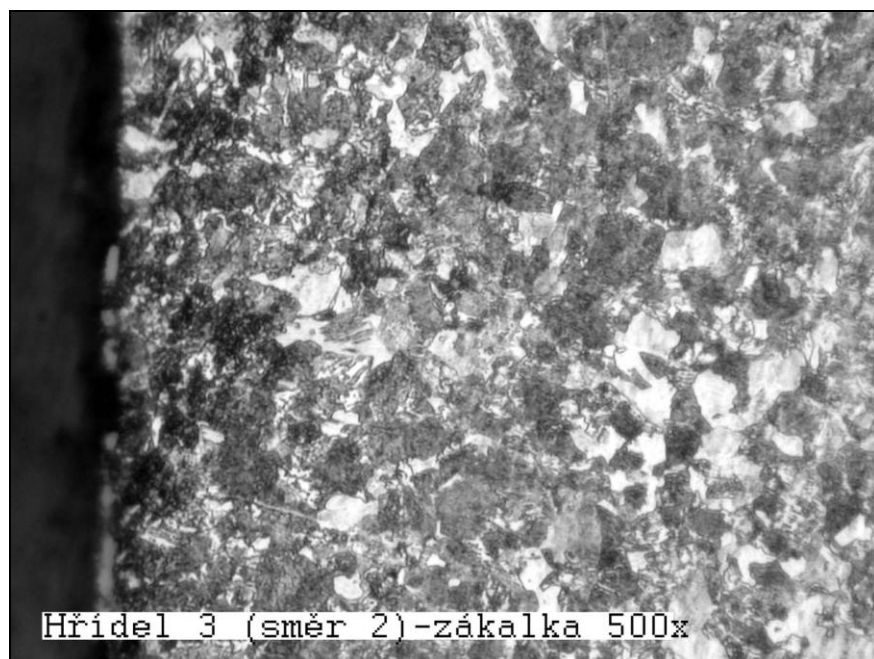
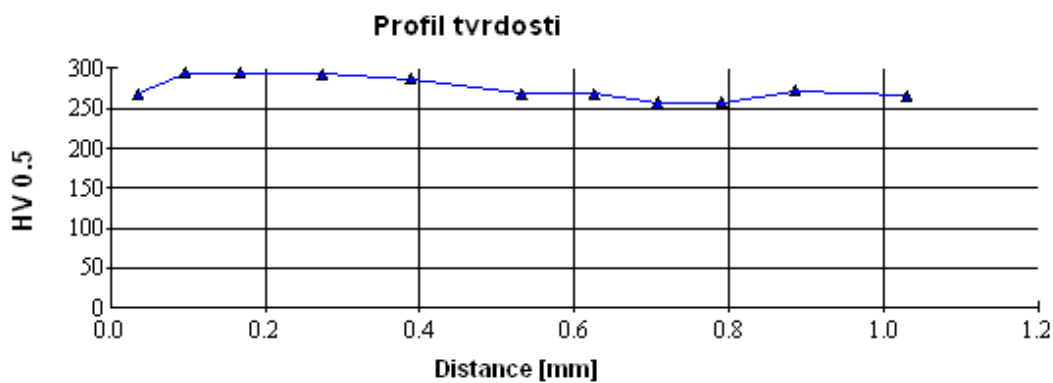
Minimum: 244.1 **Maximum:** 601.8
Průměr: 483.9 **Medián:** 569.1
StDev: 152.642



Hřidel 3 (směr 2) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	35.6	268.5	59.1	58.4	58.8
2	96.4	294.8	57.1	55.1	56.1
3	167.4	293.8	56.5	55.9	56.2
4	274.2	292.6	56.9	55.7	56.3
5	388.2	287.4	56.9	56.7	56.8
6	531.6	268.6	58.9	58.6	58.8
7	625.4	268.6	58.7	58.8	58.8
8	708.1	256.9	60.4	59.8	60.1
9	790.6	257.9	60.5	59.4	60.0
10	885.6	272.3	58.0	58.7	58.4
11	1030.2	265.8	59.2	58.9	59.1

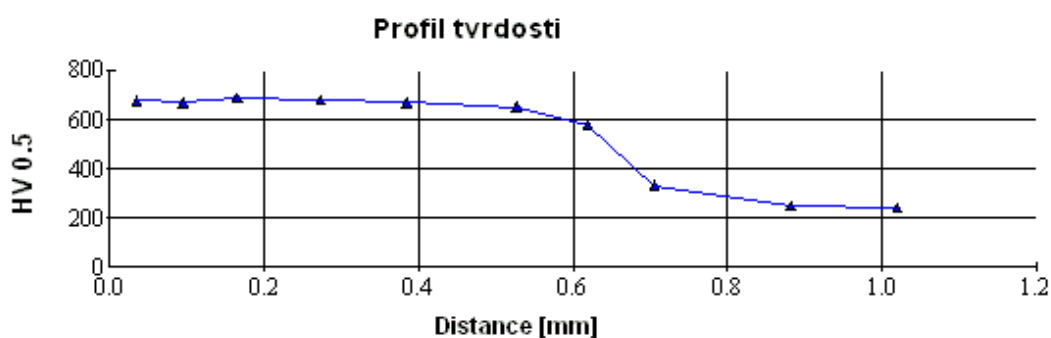
Minimum: 256.9 **Maximum:** 294.8
Průměr: 275.2 **Medián:** 268.6
StDev: 14.308



Hřidel 4 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	35.0	677.6	37.5	36.5	37.0
2	95.1	669.7	37.3	37.1	37.2
3	165.3	688.8	36.5	36.9	36.7
4	273.1	681.1	36.9	36.9	36.9
5	384.3	669.8	37.5	36.9	37.2
6	526.5	651.4	37.3	38.1	37.7
7	618.3	579.8	39.6	40.4	40.0
8	705.2	331.6	52.5	53.2	52.9
9	882.2	249.0	61.0	61.0	61.0
10	1020.6	239.2	62.7	61.9	62.3

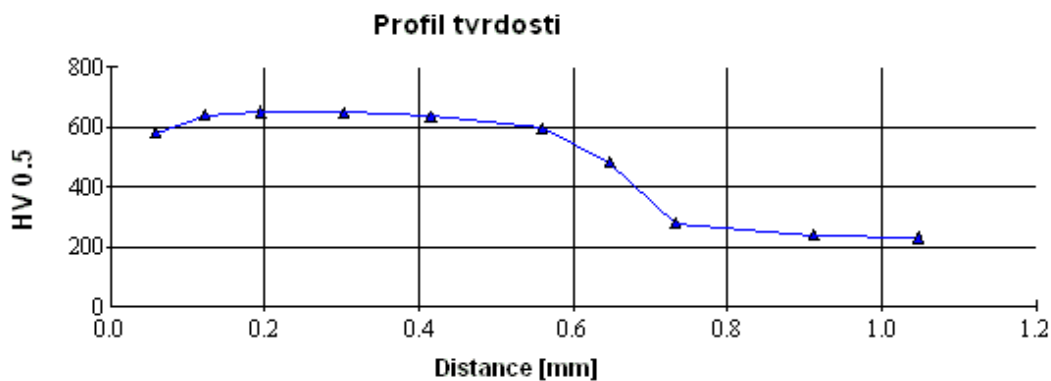
Minimum: 239.2 **Maximum:** 688.8
Průměr: 543.8 **Medián:** 660.5
StDev: 190.645



Hřidel 4 (směr 2) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	58.3	582.8	39.4	40.4	39.9
2	122.1	641.5	38.7	37.3	38.0
3	194.1	651.8	37.7	37.7	37.7
4	302.5	648.8	38.3	37.3	37.8
5	415.1	637.4	37.9	38.3	38.1
6	559.1	598.1	39.8	39.0	39.4
7	646.7	482.6	43.3	44.3	43.8
8	732.6	280.3	57.7	57.3	57.5
9	911.4	241.0	61.6	62.4	62.0
10	1047.1	231.6	64.1	62.4	63.3

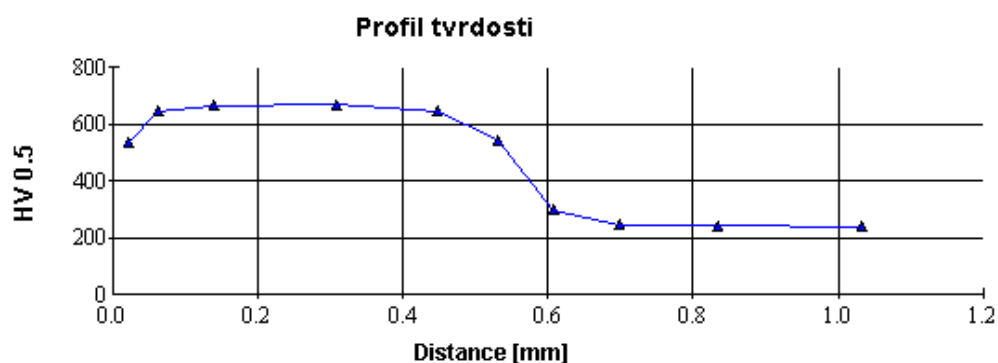
Minimum: 231.6 **Maximum:** 651.8
Průměr: 499.6 **Medián:** 590.5
StDev: 178.982



Hřidel 5 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	21.7	537.0	40.8	42.3	41.6
2	63.4	647.8	37.7	38.0	37.8
3	139.6	666.0	36.9	37.7	37.3
4	308.8	670.1	36.9	37.5	37.2
5	447.2	647.6	37.3	38.3	37.8
6	531.4	545.4	41.2	41.2	41.2
7	608.2	299.7	55.8	55.4	55.6
8	698.3	245.6	61.9	61.0	61.4
9	834.1	244.3	61.4	61.8	61.6
10	1031.8	239.2	62.7	61.8	62.3

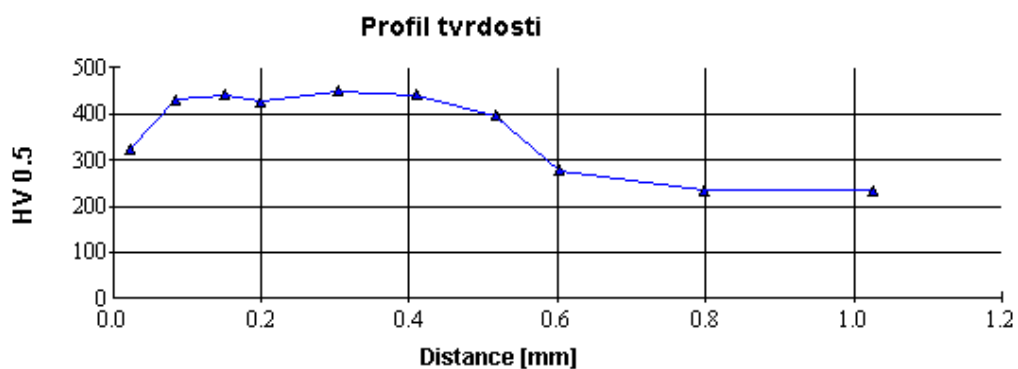
Minimum: 239.2 **Maximum:** 670.1
Průměr: 474.3 **Medián:** 541.2
StDev: 192.982



Hřidel 5 (směr 2) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	23.2	324.1	55.4	51.5	53.5
2	83.9	430.8	46.8	46.0	46.4
3	150.1	440.6	45.6	46.2	45.9
4	199.7	427.1	46.4	46.8	46.6
5	304.3	448.9	45.3	45.6	45.4
6	409.7	440.9	45.7	46.0	45.9
7	517.1	397.0	48.6	48.0	48.3
8	602.6	277.1	57.3	58.4	57.8
9	797.9	233.6	63.1	62.9	63.0
10	1025.5	233.9	62.6	63.3	63.0

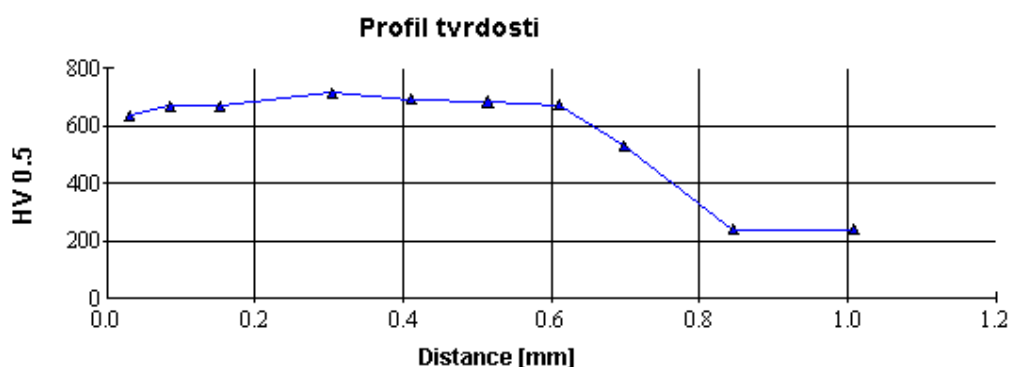
Minimum: 233.6 **Maximum:** 448.9
Průměr: 365.4 **Medián:** 412.0
StDev: 89.184



Hřidel 6 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	30.8	637.3	38.1	38.2	38.1
2	85.4	670.3	37.3	37.1	37.2
3	152.2	669.7	37.1	37.3	37.2
4	304.2	716.8	35.9	36.1	36.0
5	411.2	692.2	36.7	36.5	36.6
6	514.2	685.0	36.7	36.9	36.8
7	610.0	673.2	36.9	37.3	37.1
8	698.2	531.8	41.8	41.7	41.8
9	845.4	240.8	61.8	62.3	62.1
10	1007.6	240.8	62.5	61.6	62.1

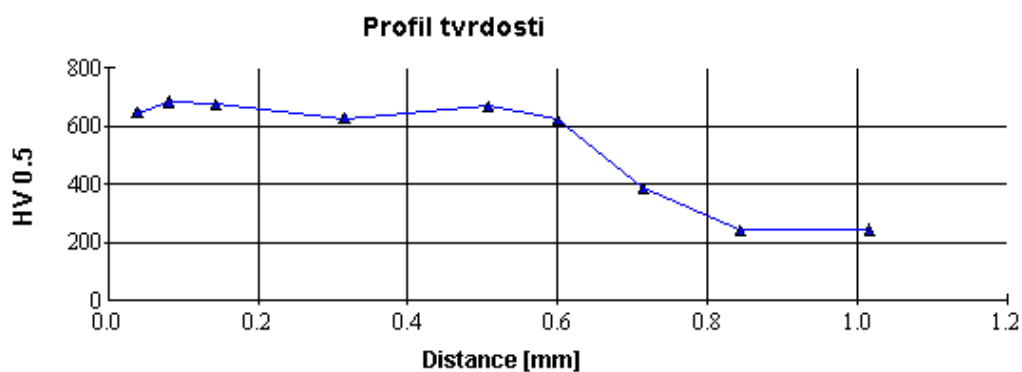
Minimum: 240.8 **Maximum:** 716.8
Průměr: 575.8 **Medián:** 670.0
StDev: 183.423



Hřidel 6 (směr 2) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	38.9	647.1	37.7	38.0	37.9
2	81.1	684.7	36.9	36.7	36.8
3	143.4	677.6	37.1	36.9	37.0
4	315.4	627.2	39.4	37.5	38.4
5	507.6	670.1	37.1	37.3	37.2
6	600.2	623.5	38.6	38.6	38.6
7	714.0	386.9	48.2	49.7	49.0
8	843.1	244.2	62.6	60.6	61.6
9	1015.8	244.9	61.2	61.8	61.5

Minimum: 244.2 **Maximum:** 684.7
Průměr: 534.0 **Medián:** 627.2
StDev: 187.274

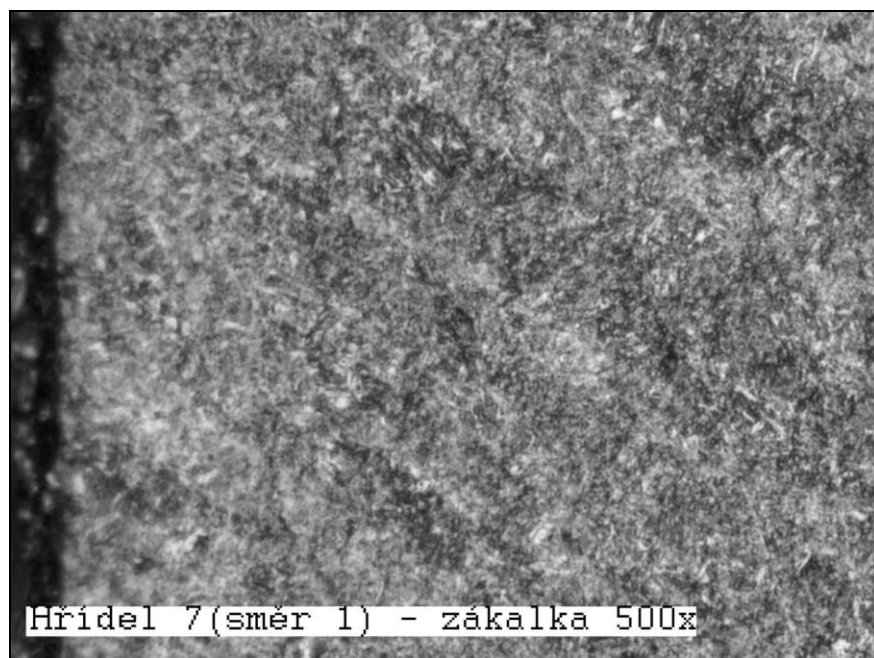
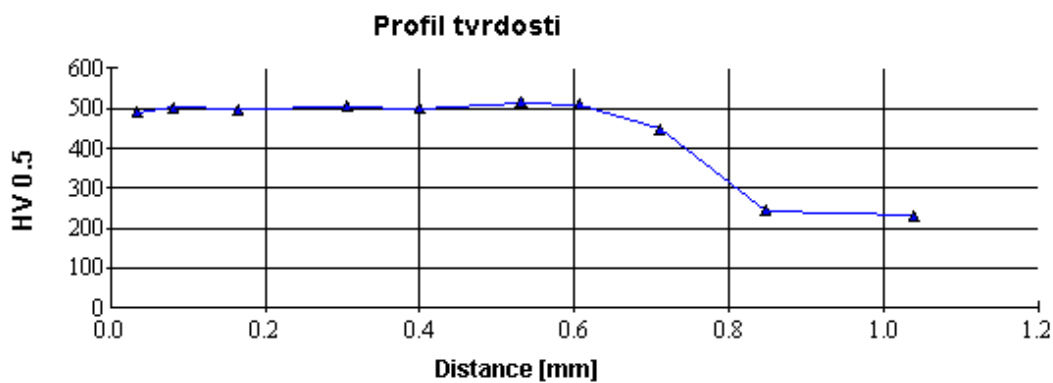


Hřidel 7 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	34.3	490.0	43.7	43.3	43.5
2	81.6	501.9	42.6	43.3	43.0
3	164.8	497.3	42.9	43.5	43.2
4	305.4	504.2	43.1	42.7	42.9
5	399.8	499.3	43.3	42.9	43.1
6	530.8	515.8	42.7	42.1	42.4
7	606.1	509.1	42.5	42.9	42.7
8	710.0	449.2	45.5	45.3	45.4
9	847.2	244.9	61.4	61.6	61.5
10	1038.6	232.3	63.0	63.3	63.2

Minimum: 232.3
Průměr: 444.4
StDev: 109.986

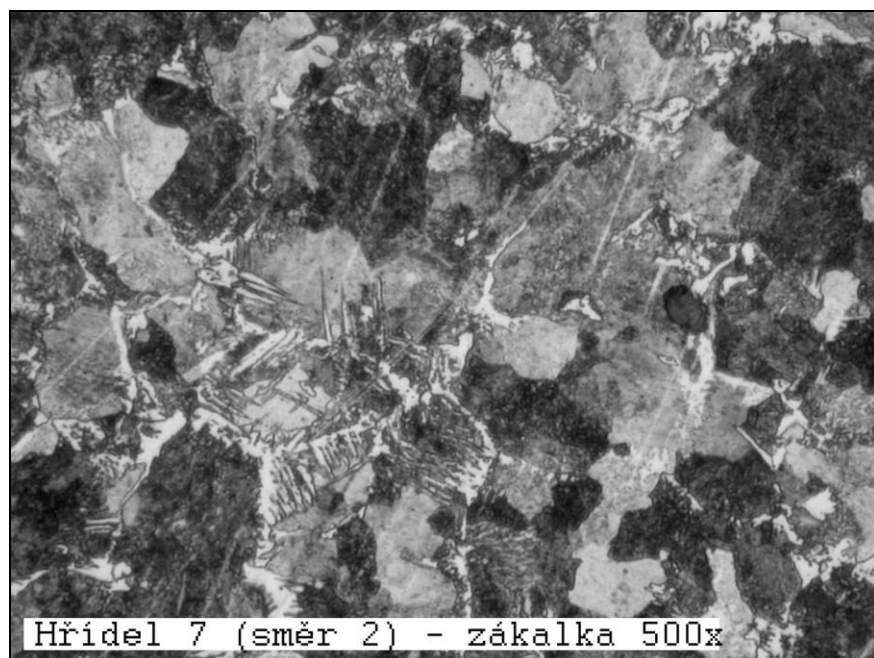
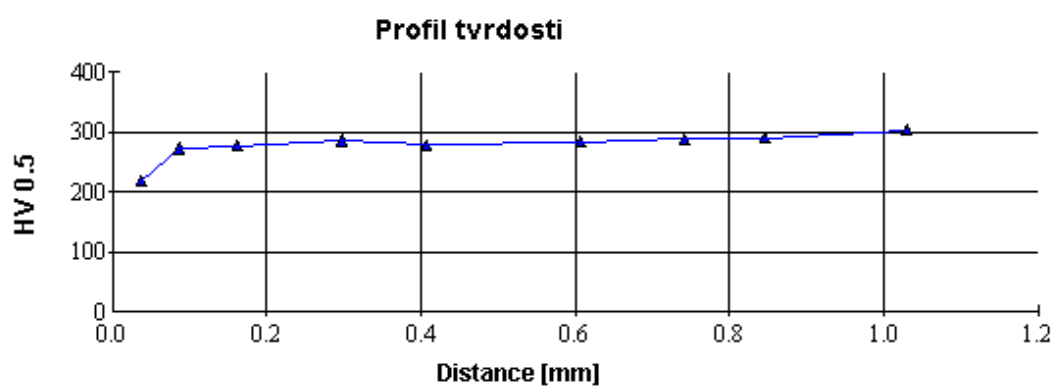
Maximum: 515.8
Medián: 498.3



Hřidel 7 (směr 2) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	36.6	218.6	63.4	66.8	65.1
2	86.2	273.4	58.3	58.1	58.2
3	161.6	277.4	57.7	57.9	57.8
4	297.4	286.5	56.7	57.1	56.9
5	406.8	278.9	58.0	57.3	57.7
6	605.9	284.4	57.1	57.1	57.1
7	740.6	288.4	56.5	56.9	56.7
8	845.5	290.6	56.7	56.3	56.5
9	1028.9	303.8	54.9	55.6	55.2

Minimum: 218.6 **Maximum:** 303.8
Průměr: 278.0 **Medián:** 284.4
StDev: 23.968

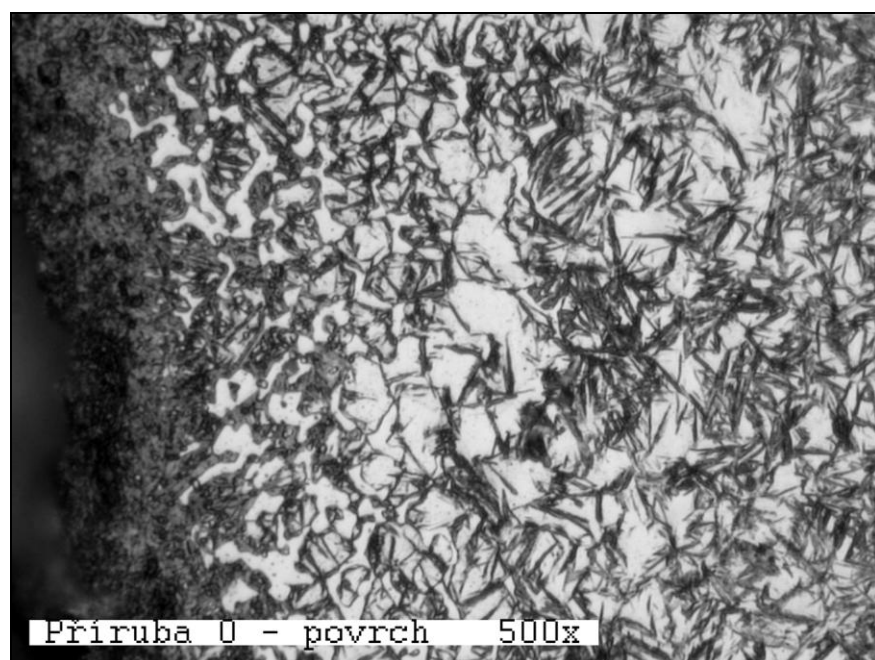
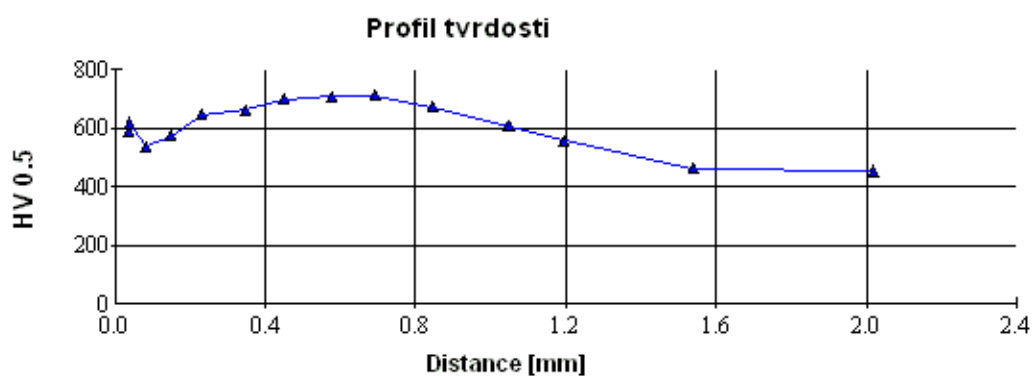


9.4 Měření gradientu tvrdosti – víko (příruba)

Příruba 0 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	34.9	588.2	39.6	39.8	39.7
2	39.9	619.0	38.2	39.2	38.7
3	81.5	537.9	40.8	42.2	41.5
4	147.3	573.9	40.6	39.8	40.2
5	229.1	648.3	37.7	37.9	37.8
6	347.9	662.8	37.1	37.7	37.4
7	448.5	699.5	36.5	36.3	36.4
8	577.1	707.9	36.5	35.9	36.2
9	692.3	712.8	36.3	35.9	36.1
10	845.9	674.0	37.3	36.9	37.1
11	1048.1	607.6	39.2	39.0	39.1
12	1193.7	559.5	40.6	40.8	40.7
13	1539.5	463.3	44.7	44.7	44.7
14	2019.5	455.0	45.1	45.1	45.1

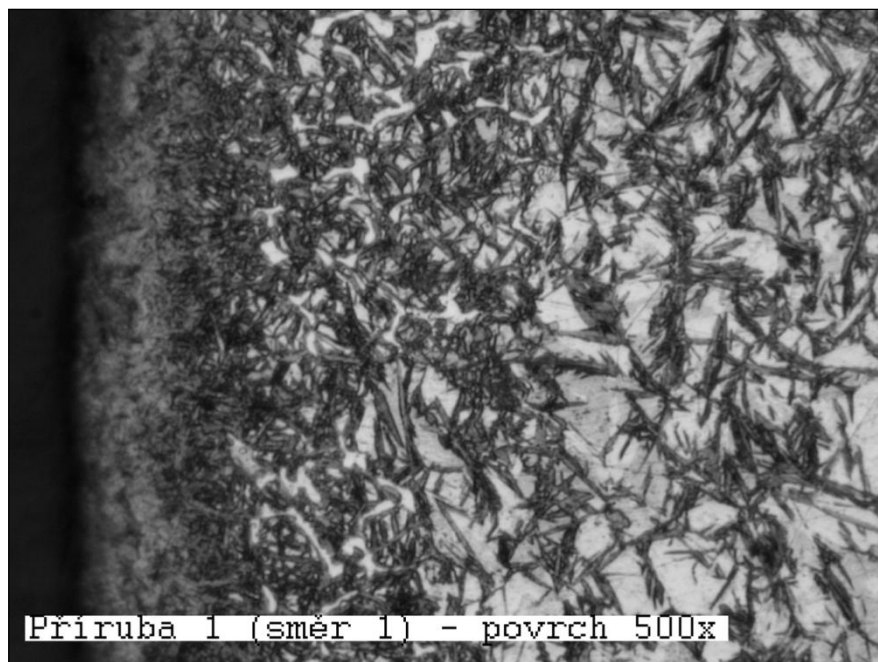
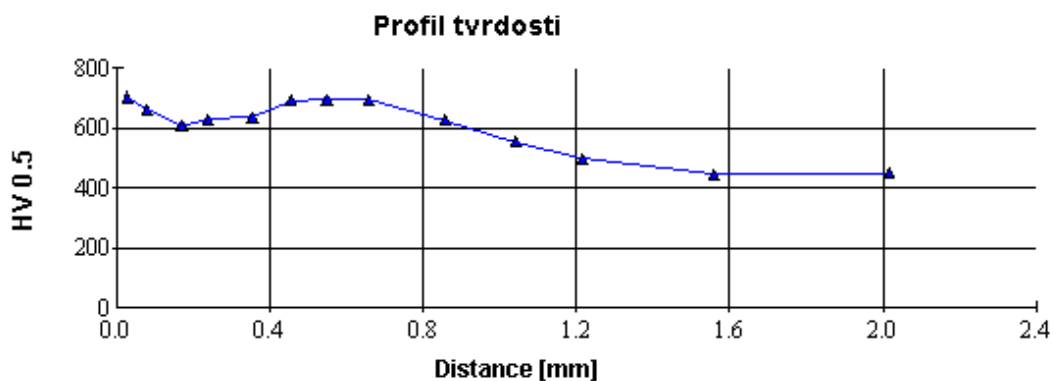
Minimum: 455.0 **Maximum:** 712.8
Průměr: 607.8 **Medián:** 613.3
StDev: 83.942



Přiruba 1 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	28.5	704.5	36.5	36.1	36.3
2	80.6	662.4	37.7	37.1	37.4
3	170.6	607.6	39.1	39.0	39.1
4	239.2	630.6	38.6	38.1	38.3
5	354.8	637.8	37.9	38.3	38.1
6	455.0	692.4	36.7	36.5	36.6
7	549.2	696.3	36.7	36.3	36.5
8	658.4	695.6	36.7	36.3	36.5
9	856.6	626.8	38.6	38.4	38.5
10	1041.4	555.9	40.7	41.0	40.8
11	1215.6	499.4	43.3	42.9	43.1
12	1557.4	446.3	45.4	45.8	45.6
13	2016.6	448.7	45.8	45.1	45.5

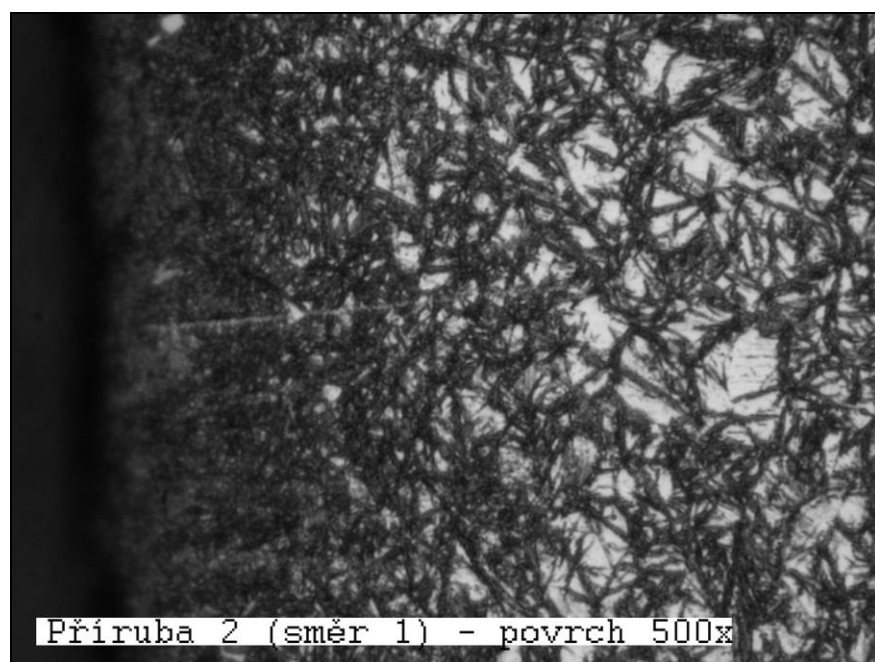
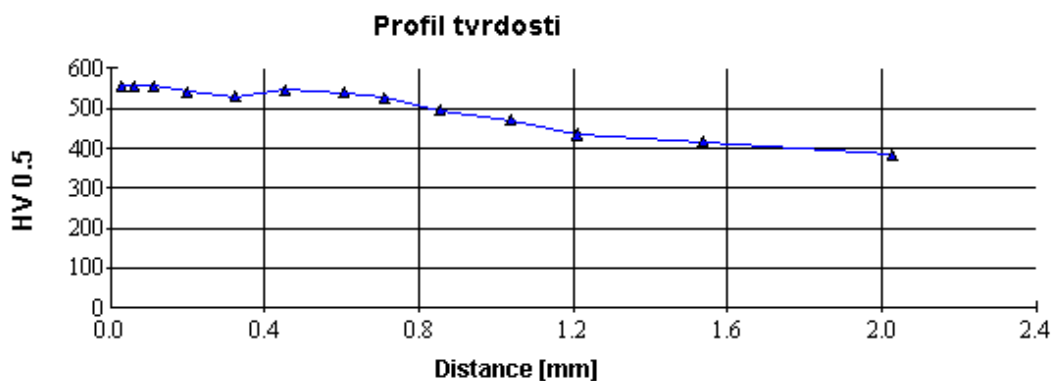
Minimum: 446.3 **Maximum:** 704.5
Průměr: 608.0 **Medián:** 630.6
StDev: 92.472



Příruba 2 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	29.2	556.0	40.4	41.3	40.8
2	60.8	555.8	40.8	40.9	40.8
3	111.8	555.6	41.0	40.7	40.8
4	199.2	542.3	41.4	41.3	41.3
5	322.8	529.6	41.8	41.8	41.8
6	451.6	547.6	41.3	41.0	41.2
7	604.6	540.1	41.4	41.4	41.4
8	710.6	526.8	41.6	42.3	42.0
9	855.0	494.7	43.1	43.5	43.3
10	1037.4	469.9	44.1	44.7	44.4
11	1209.4	434.9	45.8	46.6	46.2
12	1536.0	416.1	47.4	47.0	47.2
13	2025.4	383.8	48.8	49.5	49.2

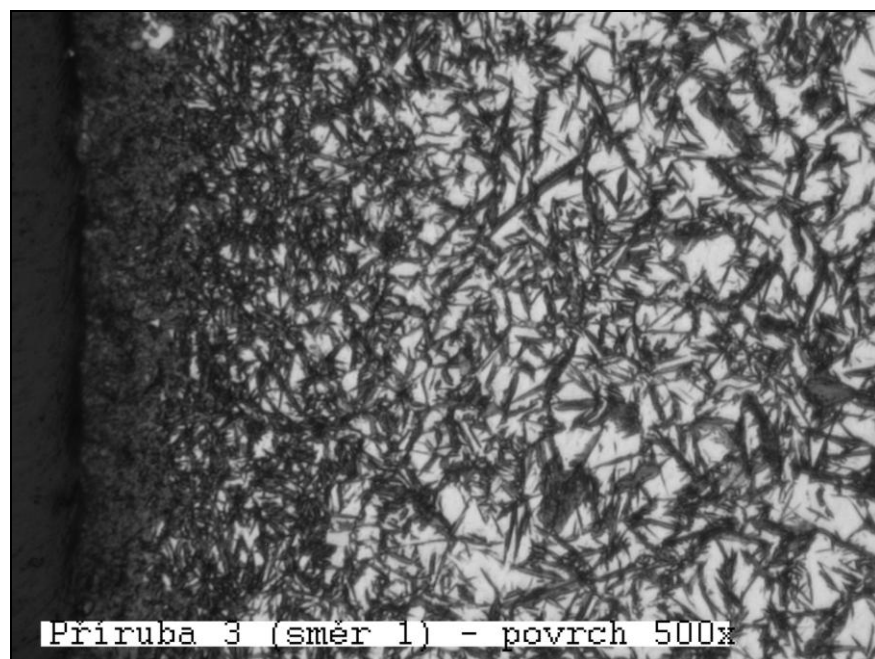
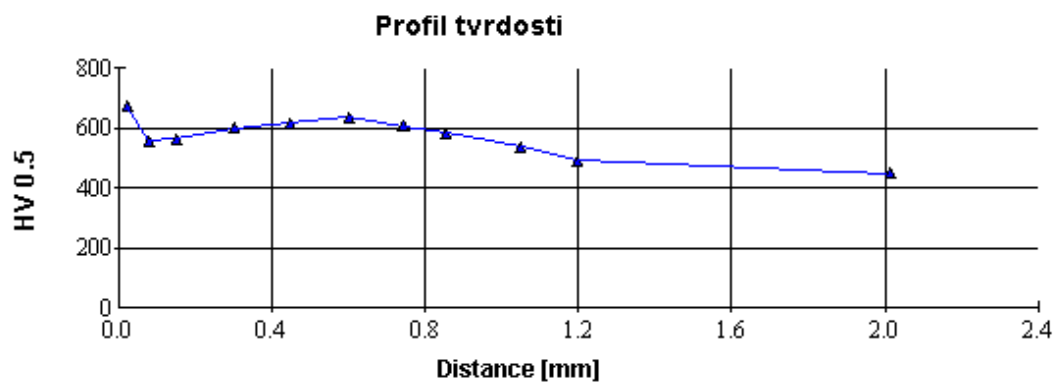
Minimum: 383.8 **Maximum:** 556.0
Průměr: 504.1 **Medián:** 529.6
StDev: 59.249



Příruba 3 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	22.9	672.6	37.1	37.1	37.1
2	80.0	559.5	40.8	40.6	40.7
3	152.0	564.7	40.6	40.4	40.5
4	301.6	601.1	39.0	39.6	39.3
5	447.4	617.3	38.4	39.2	38.8
6	602.6	637.6	37.9	38.3	38.1
7	743.6	607.0	39.2	39.0	39.1
8	854.0	585.3	39.6	40.0	39.8
9	1048.4	539.8	41.4	41.4	41.4
10	1197.4	492.6	43.1	43.7	43.4
11	2012.6	448.9	45.6	45.3	45.4

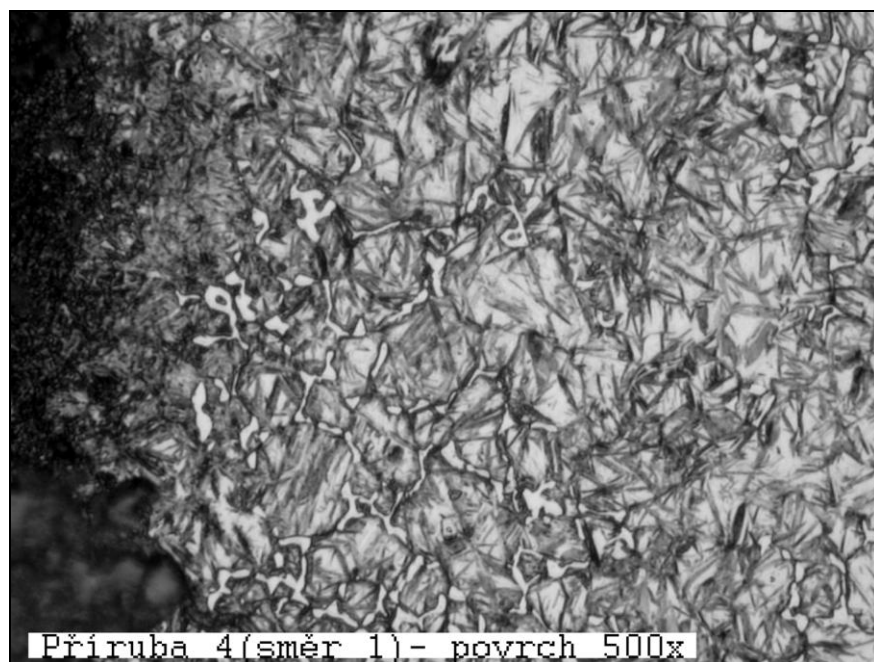
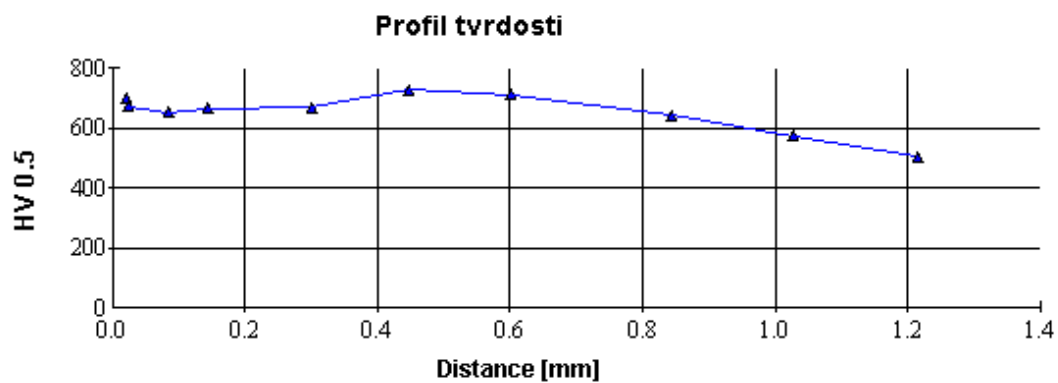
Minimum: 448.9 **Maximum:** 672.6
Průměr: 575.1 **Medián:** 585.3
StDev: 64.288



Příruba 4 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μ m]	HV 0.5	d1 [μ m]	d2 [μ m]	d [μ m]
1	21.4	699.7	36.5	36.3	36.4
2	24.4	673.8	36.9	37.3	37.1
3	84.0	655.1	37.9	37.3	37.6
4	143.4	666.2	37.5	37.1	37.3
5	300.8	669.9	37.7	36.7	37.2
6	447.4	729.0	35.5	35.9	35.7
7	600.6	711.7	36.5	35.7	36.1
8	843.8	644.5	37.9	37.9	37.9
9	1027.2	573.6	40.4	40.0	40.2
10	1214.8	506.6	42.9	42.7	42.8

Minimum: 506.6 **Maximum:** 729.0
Průměr: 653.0 **Medián:** 668.1
StDev: 66.760

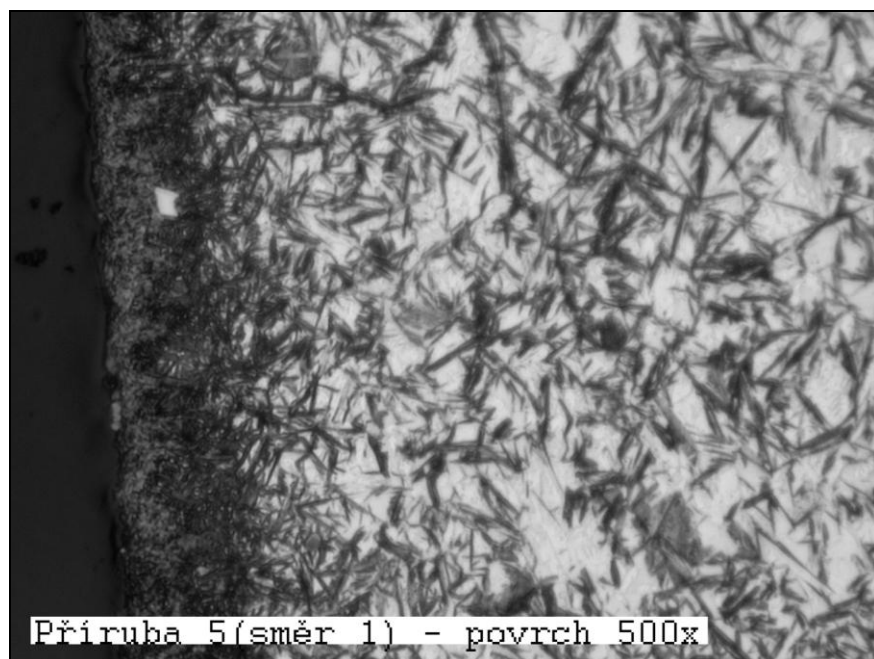
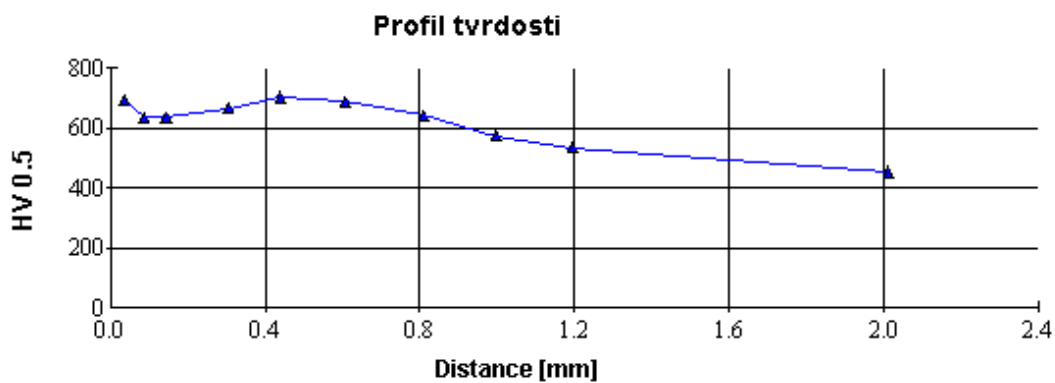


Příruba 5 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	35.8	692.9	36.5	36.7	36.6
2	87.6	637.8	38.3	37.9	38.1
3	143.8	637.7	38.2	38.1	38.1
4	304.6	667.0	36.9	37.7	37.3
5	438.4	704.7	36.5	36.1	36.3
6	606.6	688.6	36.5	36.9	36.7
7	809.6	643.6	37.9	38.0	38.0
8	996.8	573.9	40.0	40.4	40.2
9	1195.4	534.1	41.6	41.7	41.7
10	2010.6	454.8	44.7	45.6	45.2

Minimum: 454.8
Průměr: 623.5
StDev: 79.769

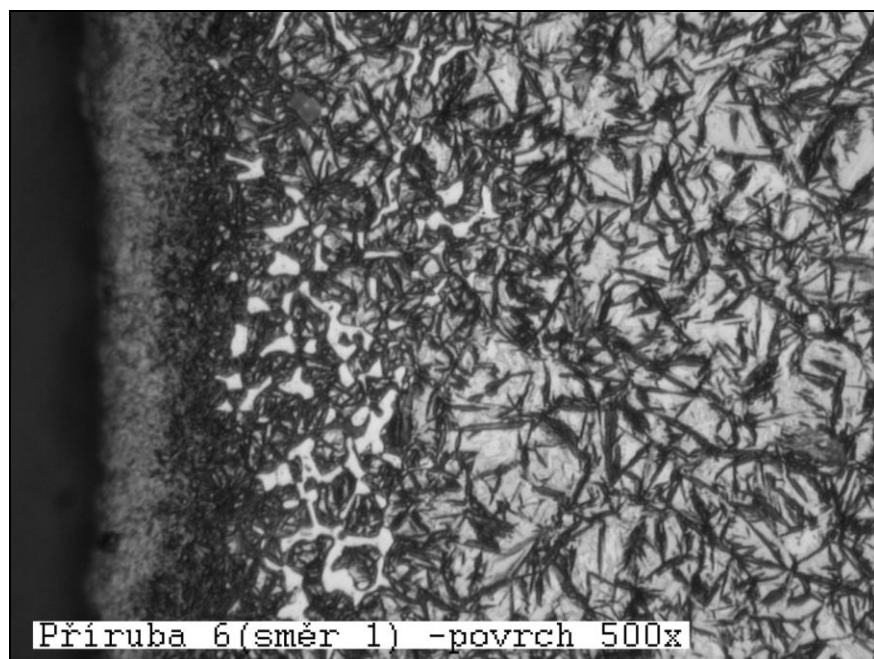
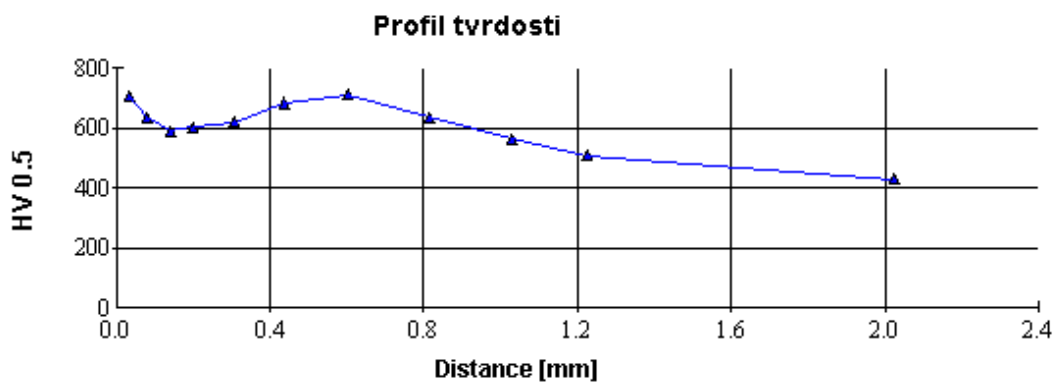
Maximum: 704.7
Medián: 640.7



Příruba 6 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	34.3	709.7	35.6	36.7	36.1
2	78.7	637.8	37.9	38.3	38.1
3	141.1	589.8	39.3	40.0	39.6
4	198.3	604.2	39.2	39.2	39.2
5	306.9	620.8	38.5	38.7	38.6
6	437.3	684.5	37.1	36.5	36.8
7	603.3	712.8	36.1	36.1	36.1
8	814.3	637.1	37.8	38.5	38.1
9	1028.5	564.3	40.8	40.2	40.5
10	1224.9	509.3	42.8	42.5	42.7
11	2023.9	431.2	46.4	46.4	46.4

Minimum: 431.2 **Maximum:** 712.8
Průměr: 609.2 **Medián:** 620.8
StDev: 85.040



Příruba 7 (směr 1) - gradient tvrdosti

	Dist[μm]	HV 0.5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	9.0	649.1	37.7	37.9	37.8
2	81.2	630.6	38.2	38.5	38.3
3	143.2	598.1	39.2	39.6	39.4
4	212.2	582.4	39.8	40.0	39.9
5	307.4	545.8	40.4	42.0	41.2
6	369.8	611.3	38.7	39.2	38.9
7	442.8	661.9	37.9	36.9	37.4
8	608.4	658.7	37.1	37.9	37.5
9	826.6	616.4	38.8	38.8	38.8
10	1042.4	529.4	41.8	41.9	41.8
11	1219.0	504.1	43.1	42.7	42.9
12	2057.4	438.7	46.6	45.3	46.0

Minimum: 438.7 **Maximum:** 661.9
Průměr: 585.5 **Medián:** 604.7
StDev: 68.740

